



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사학위 청구논문
네트워크 구조 확률함수를 이용한
다중 연결 시스템 취약성 해석

**Vulnerability Analysis of
Multiple Connected System
using Network Structure Probability Function**

2017년 8월

서울대학교 대학원
생태조경·지역시스템공학부 지역시스템공학전공
은 상 규

국문초록

시스템은 요소와 요소들의 유기적 결합으로 연계되어 있어, 상호 작용이 발생하기 때문에 다중 연결 구조로 이루어진 네트워크이다. 네트워크는 절점을 구성 요소로 하며, 절점의 관계를 연결선으로 나타낸다. 네트워크 분석 기법 중 다중 연결 구조 특징을 연결선 수의 확률 함수로 표현한 방법은 복잡계 시스템의 이해에 유용하다. 하지만, 기존 네트워크 취약성 해석은 절점 제거에 따른 구조 변화 특징을 여러 해석 방법을 이용하여 종합해야 하는 단점이 존재한다. 따라서 네트워크 연결 구조를 표현한 확률 함수를 이용하여, 여러 해석 방법을 거치지 않고, 직접 시스템 취약성을 평가할 수 있다면, 해석의 효율성을 높일 수 있을 것이다.

네트워크를 활용한 다중 연결 시스템의 취약성 해석은 군집 연결 절점을 이용한 취약 지점의 확률 해석과 연결 구조를 고려한 취약성 분석으로 이루어졌다. 다중 연결 시스템의 취약 지점은 네트워크의 중심성이 높은 절점과 군집을 연결하는 절점이다. 네트워크에서 중심성이 높은 절점은 사이정도와 연결정도 등으로 분석하며, 군집 연결 절점은 네트워크의 응집력 변화량 측정 및 랜덤워크 기반 방법으로 평가하였다. 랜덤워크에 의해 분석된 취약 지점은 네트워크의 정보가 알려지지 않은 조건에서 이용할 수 있는 장점이 있었다. 그러나 랜덤워크에 의한 취약 지점은 연결선의 크기를 고려하지 않아 다중 연결 시스템의 적용에 한계가 있었다. 다중 연결 시스템의 취약 지점 분석은 가중치 연결선을 고려하기 위해서 확률 및 컨볼루션을 적용하여 기존 방법을 개선하였다.

지역 사회의 요소간의 연결로 인한 나타나는 복잡한 현상을 모사한 다중 연결 시스템은 척도없는 네트워크와 무작위 네트워크의 결합한 형태로 나타났다. 무작위 네트워크는 절점이 가지고 있는 연결선의 수가 균등한 형태이며, 척도없는 네트워크는 절점에 포함된 연결선의 수가 불균등한 형태이다. 척도없는 네트워크는 중심성이 높은 절점을 우선적으로 제거시 취약성이 높아지지만, 무작위 네트워크의 취약성은 절점의 제거 순서에 영향을 받지 않았다. 따라서 네트워크의 취약성은 절점에 포함된 연결선의 분포에 의해 결정되었다. 다중 연결 시스템의 취약성 평가는 절점을 제거하고 네트워크의 지름과 근접정도를 반복 계산해야 한다. 감마 분포의 형상모수는 척도없는 네트워크 및 무작위 네트워크의 절점에 포함된 연결선 분포를 나타낼 수 있으며, 다중 연결 시스템의 절점에 연결된 선의 분포를 표현할 수 있었다. 다중 연결을 고려한 시스템의 취약 평가는 감마 분포의 형상모수를 활용하였다.

지역 사회의 구성 요소 간 연결은 사람 및 물류의 이동, 정보의 공유 등 대상체에 따라 서로 다른 네트워크 구조를 가졌다. 국내 농산물 수출 품목의 연결은 물류의 이동으로 구성되며, 연결선 집중이 발행하는 특정 품목은 무역의 취약성을 커지게 하였다. 조류 독감은 사람의 이동으로 농가 간 연결이 형성됨에 따라 확산이 진행되며, 전파 속도를 늦추거나 차단 지점의 효과를 높여 확산의 취약성을 감소시킬 수 있었다. 콘크리트의 정밀 크랙 해석을 수행하기 위해서는 구조물의 응력경로를 정확히 탐색할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 연속체를 이용하는 방법보다 등가의 이산체로 대체하는 방법이 효율적이었다. 따라서 다중 연결 구조를 고려한 시스템의 취약성 해석을 이용하여 농산물 수출 품목의 편중에 따른 취약 정도를 평가하고, 조류 독감 확산 범위를 감소시킬 수 있는 농가의 연결 구조를 고찰하였으

며, 등가의 이산체인 불규칙 삼각망을 이용해서 응력 경로 해석 시간을 단축할 수 있는 네트워크 조건에 대하여 분석하였다.

연구결과 신선 농산물 수출 품목을 분석한 결과 정책 지원 대상 품목의 경우는 네트워크의 취약성을 높이는 결과를 가져왔다. 조류 독감의 확산 문제에서는 농가와 농가의 연결 구조가 불균등하게 될수록 확산 차단 효과가 높았다. 불규칙 삼각망을 이용한 응력 경로 탐색의 문제에서는 삼각망을 구성하는 각 절점의 연결선 빈도가 6개인 경우에 가장 효율적으로 수행할 수 있었다. 요약하면 다중 연결 시스템의 취약성은 불균등 구조와 균등 구조의 비율에 따라 변화하였고, 감마 분포의 형상모수를 이용하여 다중 연결 구조를 평가할 수 있었으며, 형상모수가 커짐에 따라 시스템의 취약성은 지수 함수의 형태로 감소하였다. 지역 발전에 따라 복잡해지고 있는 시스템의 경우 연쇄적 반응의 확대·억제 지점을 고려하여야 하는데, 본 연구에서 제안하는 취약성 해석 방법은 그 대안이 될 수 있는 것으로 판단된다.

주요어 : 다중 연결 시스템, 네트워크 구조, 확률 함수, 시스템 취약성,
농산물 무역 네트워크, 조류 독감 확산 모델

학 번 : 2012-30315

목 차

제1장 서 론	1
제2장 연구사	5
2.1 복잡계와 다중 연결 시스템의 관계	5
2.2 네트워크 구조 확률적 표현	8
2.3 네트워크 취약성 해석	10
제3장 네트워크 구조 기반 취약성 해석 기법	14
3.1 네트워크 중심성 및 군집 분석	14
3.2 네트워크의 연쇄적 반응 경로 확률 분석	19
3.3 네트워크 구조 취약성 확률 해석	32
제4장 다중 연결 시스템의 취약성 모델 개발	51
4.1 모델의 개발	51
4.1.1 모델의 해석 범위	51
4.1.2 네트워크 구조 확률 함수 기반 취약성 모델 개발	52
4.2 모델의 검증	53
제5장 다중 연결 시스템의 취약성 모델 적용	74
5.1 국내 농산물 수출 품목의 연결 구조 취약성 해석	74
5.1.1 국내 농산물 수출 품목 네트워크 구성	75
5.1.2 국내 농산물 수출 품목 네트워크 취약성 분석	79
5.1.3 고찰	91

5.2 가축 전염병 확산 연결 구조 취약성 해석	93
5.2.1 조류 독감 확산 네트워크 구성	94
5.2.2 조류 독감 확산 네트워크 취약성 분석	105
5.2.3 고찰	112
5.3 구조물 응력경로 효율성 해석	114
5.3.1 불규칙 삼각망과 네트워크 구조 확률 함수의 관계	114
5.3.2 확률 함수의 구조물 응력경로 효율성 해석	116
5.3.3 고찰	120
 제6장 결 론	 122
 참고문헌	 127

표 목 차

Table 3.1 Gaussian distribution of nodes for finding community bridge	29
Table 3.2 Comparison of community bridge by PCBF and MCS	31
Table 4.1 Subject of study for verification	53
Table 4.2 Feature of agricultural product trade data provided by FAO	56
Table 4.3 Feature of agricultural product export data in 2003~2013(FAO)	58
Table 4.4 Apple trade network vulnerability using shape factor and recursive calculation	63
Table 4.5 Mushroom trade network vulnerability using shape factor and recursive calculation	63
Table 4.6 Pear trade network vulnerability using shape factor and recursive calculation	64
Table 4.7 Community bridge between PCBF and MCS about apple trade major region in 2003	66
Table 4.8 Community bridge between PCBF and MCS about mushroom trade major region 2004	68
Table 4.9 Community bridge between PCBF and MCS about pear trade major region 2010	70
Table 5.1 Statistical data of domestic agricultural products export items from TRASS	77
Table 5.2 Using data of items and countries	

for vulnerability analysis	78
Table 5.3 Centrality average of policy support items for 10 years ...	83
Table 5.4 Variable description for probit regression	89
Table 5.5 Result of probit regression about agricultural product export network vulnerability	90
Table 5.6 Example of HPAI infected farmhouse current state data in 2008	95
Table 5.7 Example of HPAI infected farmhouse tracking data in 2008	96
Table 5.8 HPAI outbreak farm and region in 2008	97
Table 5.9 Odds ratio of farm–association (standard error of the odds ratio)	100
Table 5.10 Community of HPAI outbreak region in 2008	102
Table 5.11 Community bridge from IP1 using PCBF	106
Table 5.12 Efficacy according to HPAI blocking coverage	107

그림 목차

Fig. 3.1 Community and community bridge	16
Fig. 3.2 Convolution in network	21
Fig. 3.3 Schematic illustration of community bridge finder	22
Fig. 3.4 Method of vulnerability node analysis using probability and convolution	26
Fig. 3.5 Method of path analysis from origin node	28
Fig. 3.6 Community bridge by PCBF and CBF	30
Fig. 3.7 Determinants of network structure	33
Fig. 3.8 Shape factor and scale factor by distribution type	34
Fig. 3.9 Random network and distribution of edges	36
Fig. 3.10 Scale-free network and distribution of edges	38
Fig. 3.11 Real network and distribution of edges	40
Fig. 3.12 Finding minimal vulnerability network feature using edge distribution	42
Fig. 3.13 Flowchart to develop vulnerability evaluation method using gamma distribution	43
Fig. 3.14 Vulnerability of scale-free network according to edge distribution	45
Fig. 3.15 Vulnerability of random network according to edge distribution	46
Fig. 3.16 Vulnerability of real network according to edge distribution	47
Fig. 3.17 change of shape factor and vulnerability according to edge distribution	49

Fig. 3.18 Relationship between shape factor and network vulnerability	50
Fig. 4.1 Apple trade network in 2013	59
Fig. 4.2 Mushroom trade network in 2013	60
Fig. 4.3 Pear trade network in 2013	61
Fig. 4.4 Target selection for conformity assessment using apple trade in 2003	67
Fig. 4.5 Target selection for conformity assessment using mushroom trade in 2004	69
Fig. 4.6 Target selection for conformity assessment using pear trade in 2010	71
Fig. 5.1 Method of real network configuration by agricultural export item	76
Fig. 5.2 Degree changes of export-led items in 2005~2014	81
Fig. 5.3 Closeness changes of export-led items in 2005~2014	82
Fig. 5.4 Agricultural product community changes in 2005~2014	84
Fig. 5.5 Modularity changes by node elimination	85
Fig. 5.6 Vulnerability of agricultural product export network	87
Fig. 5.7 Vulnerability of agricultural fresh product export network	88
Fig. 5.8 Analysis of livestock epidemic spread inhabitation efficacy by PCBF	99
Fig. 5.9 HPAI outbreak region in 2008	103
Fig. 5.10 HPAI spread network in 2008	104
Fig. 5.11 Comparison of network community changes by blocking nodes	108
Fig. 5.12 Efficacy of real network within 50% random network and 50% scale-free network by blocking nodes	111
Fig. 5.13 Efficacy of real network within 80% random network and 20% scale-free network by blocking nodes	111

Fig. 5.14 Stress path in simple beam	115
Fig. 5.15 Analysis of stress path calculation efficiency according to TIN irregular degree	117
Fig. 5.16 Changes of PI and shape factor according to TIN irregular degree	119
Fig. 5.17 Relationship between shape factor and PI	119
Fig. 5.18 Elements in plane stress	121

제1장 서론

지역 사회의 요소들로 구성된 다중 연결 시스템은 연속성을 이해하기 위해서 취약성 평가가 필요하다(Romero et al., 2008; Park et al., 2013). 지역 사회에서의 다중 연결 시스템은 성격이 다른 요소의 연결로 이루어진 경제 활동 집합이며, 지역 사회의 발전은 구성 요소인 하위 시스템의 새로운 연결에 의해 촉진된다(Marc et al., 2014; Welsh, 2014). 또한 지역 사회의 발전 잠재성은 새로운 연결의 복잡한 정도가 증가할수록 상승한다(Chamber, 2014). 하위 시스템의 연결은 새로운 중간 시스템을 구성하며, 하위 시스템의 영향력 범위는 확대된다(Callaway and Newman 2000; Cohen et al., 2000). 즉, 하위 시스템의 기능 상실은 전체 시스템인 지역 사회에 영향을 준다(Cohen et al., 2001). 다중 연결 시스템의 취약성 해석은 지역 사회의 발전 및 연속성을 위해서 필요하다.

앞서 언급한 다중 연결 시스템을 해석하는 네트워크 분석 기법은 여러 요인들을 고려한다(Anne et al., 2009). 네트워크 분석 기법은 다중 연결 시스템과 같이 복잡한 현상을 점과 연결선을 이용하여 단순화 하며(Erdos and Renyi, 1960), 수학을 이용하여 연결선과 절점의 특징을 분석한다(Jolly et al., 2001). 즉, 네트워크 분석 기법은 복잡한 현상을 절점과 연결선으로 표현하고 절점에 포함된 연결선을 토대로 다중 연결 시스템의 취약성을 해석한다(Albert et al., 1999; Newman et al., 2002).

네트워크의 취약성은 절점 제거에 따른 지름 변화량 분석에 따르면 특정 절점이 연결선을 독식하기 때문에 발생한다(Barabasi and Albert, 1999; Michelle and Newman, 2002). Bonacich(1987)는 네트워크에서 절점이 가지는 연결선 정도를 중심성(centrality)이라 표현하였고 연결정도(degree)와 사이정도(betweenness) 등을 통해 연결이 많이 된 절점의 분석 기법을 제시하였다. Albert 등은 네트워크의 취약성 정도를 절점이 제거된 네트워크의 지름인 절점들의 연결경로 정도로 나타내었고, 무작위 네트워크(random network)와 척도없는 네트워크(scale-free network)에서 절점의 중심성 정도에 따른 취약성 크기의 변화 정도를 분석하였다(Albert et al., 1999; Crucitti et al., 2004; Redner, 1998; Venter et al., 2001). 중심성이 높은 절점은 네트워크의 취약성을 높이는 요인이며, 연결선을 독식하는 절점들로 구성된 척도없는 네트워크의 취약성은 연결선 분포가 균등한 무작위 네트워크보다 큰 것으로 분석되었다(Albert et al., 2000; Lienert et al., 2013).

중심성 방법은 연쇄적 반응을 고려한 네트워크의 취약성 감소에 다음 사례로부터 한계가 있는 것으로 밝혀졌다(Moreno et al., 2003). 2003년 미국 북동부의 대규모 정전은 중심성이 낮은 절점에서 발생한 문제가 군집과 군집을 연결하는 절점에 전달됨에 따라 피해의 규모가 커진 현상으로 연쇄적 반응에 따른 시스템 기능 상실을 나타나는 사례이다(Kang et al., 2004). Goh 등(2003)은 Bak-Tang-Wiesenfeld(BTW) 모래사태 모델을 네트워크에 적용하여 취약성을 분석하였으며, 군집(community) 연결 절점이 네트워크 취약성에 영향을 주는 것을 밝혔다. 군집 연결 절점(community bridge)을 제거한 방법은 연쇄적 반응이 발생하고 있는 네트워크에서 취약성을 감소시켰다(Liu and Hu, 2005). 또한 군집 연결 절점은 네트워크의 정보가 충분하지 않은 조건에서 연쇄적 반응의 차단에 활용된다(Salathe and Jones, 2010; Gong et al., 2013).

군집 연결 절점과 네트워크의 취약성 정도는 다중 연결 시스템의 취약성 해석을 함에 있어 한계가 있다. 혼합 네트워크(real network)는 척도없는 네트워크와 무작위 네트워크의 결합된 형태로서 다중 연결 시스템을 모사할 수 있다(Albert and Barabasi, 2002; Humphries, 2008). 그러나 혼합 네트워크로 모사되는 다중 연결 시스템의 취약성 평가는 절점 제거에 따른 네트워크의 지름 및 BTW 측정의 반복수행이 요구된다(Barthelemy et al., 2004; Sema et al., 2011). 다중 연결 시스템을 구성하는 요소들의 관계는 직접 연결뿐만 아니라 간접 연결에 의해서 만들어지고 있어 다중 연결 시스템의 모사에서 가중치 연결선이 필요하다(Lee et al., 2013). 기존의 군집 연결 절점 분석 방법은 가중치 연결선이 없는 네트워크를 대상으로 하기 때문에 다중 연결 시스템의 군집 연결 절점 도출에 한계가 있다(Eun et al., 2017).

이와 같은 이유로 다중 연결 시스템의 취약성 평가는 연결선의 가중치를 고려하여야 하고 절점의 연결선 분포를 정량화할 필요가 있다(Dorogovtsev and Mendes, 2002). 무작위 및 척도없는 네트워크의 절점에 포함된 연결선 빈도는 가우스 분포(Gauss distribution)와 멱급수 분포(Power law distribution)로 각 각 표현될 뿐 아니라 네트워크 특징도 설명할 수 있다(Barabasi et al., 1999; Thomason, 1987). Lee(2014)는 무작위 네트워크, 척도없는 네트워크, 다중 연결 시스템의 연결선 분포를 감마분포의 형상모수 크기로 나타내어서 취약 지점을 분석하였다. Youn 등은 연쇄적 현상 중 하나인 힘의 전달 정도를 분석하기 위해서 네트워크에 확률과 컨볼루션(convolution)을 적용하였고, 특정 절점에 작용한 힘이 인접 절점으로 전달되는 과정을 보여주었다(Youn et al., 2010; Lee 2015).

따라서 본 연구에서는 다중 연결 시스템을 모사한 가중치 연결선과 동종 절점으로 구성된 다중 연결 시스템의 취약성을 해석하기 위해서, 형상모수 기반 취약성 평가와 확률을 고려한 군집 연결 절점 분석을 포함하는 기법을

개발한다. 다중 연결 시스템 모델의 적합성 평가는 농산물 교역량 자료를 대상으로 한다. 또한 개발한 모델은 가축 전염병 확산에 적용하고 구조물 응력경로 효율성을 분석함으로써 다중 연결 시스템에서 발생할 수 있는 문제의 해결방안을 제시한다.

제2장 연구사

2.1 복잡계와 다중 연결 시스템의 관계

다중 연결 시스템은 자연과학 및 사회과학에서 활발히 연구되고 있는 대상으로 수많은 요소들의 비선형적 사회작용에 의해 질서와 무질서의 성질을 동시에 나타내는 복잡계(complex system)이다(Waldrop, 1993). 복잡계를 나타내는 대표적 현상에는 사람들이 서로의 이해관계에 의해 얽혀 있는 사회, 세포들의 기작으로 나타나는 생명현상, 컴퓨터들의 통신수단인 인터넷 등이 있다. 네트워크는 복잡계를 절점과 연결선으로 단순화시켜 그래프로 나타내었다(Barabasi and Albert, 1999; Cohen and Havlin, 2011).

복잡계 이론 중 그래프 이론은 경로문제, 위상 및 기하 문제 등을 해결하는데 이용되었고, 구스타프 키르히호프의 전기회로를 다루는 키르히호프 회로법칙은 네트워크 이론의 시초가 되었다(Dijkstra, 1959; Ford and Fulkerson, 1956; Freeman, 1979; Beauchamp, 1965). 절점과 연결선으로 구성된 그래프가 처음 적용된 예는 Euler가 쾨니히스베르크 다리문제의 한붓그리기 존재 여부에 대한 필요충분조건을 제시하면서부터이다(Euler, 1741). 사회학 연구에서는 일부 현상을 절점과 연결선으로 표현하면 절점의 연결선 수 빈도가 가우스 분포로 나타난다. 또한 이를 무작위 네트워크를 이용하여 사회 요소들 간의 관계를 표현하였다(Kim and Wilhelm, 2008).

네트워크 이론이 복잡계 문제에 본격적으로 적용한 시초는 Albert가 복잡계 네트워크에 존재하는 허브(hub)가 불균등한 구조를 발생시켜 새로운

현상을 나타낸 예이다(Albert et al., 1999). 이 연구에서는 20~30만 개의 웹사이트 연결 관계를 분석한 결과 가우스 분포가 아닌 일부 웹사이트에 연결성이 집중되어 있는 멱급수의 법칙을 따르는 분포로 이루어져 있음을 발견하였다. Huberman 등은 웹 네트워크의 구조가 불균등한 분포 형태를 가지는 것을 보다 많은 자료를 가지고 확인하였다(Huberman and Adamic, 1999; Kleinberg et al., 1999; Redner, 1998). 인맥 관계, 논문 인용, 유전자 구조 등 실세계의 다양한 문제를 다루는 연구는 불균등한 멱급수의 분포를 가지는 네트워크로 사회를 모델링할 수 있었다(Barabasi et al., 1999; Albert et al., 2000; Venter et al., 2001). 임의로 생성되는 절점이 연결될 확률은 다른 절점들이 가지고 있는 연결선 수에 비례하여 결정되는 선호적 연결(preferential attachment)의 법칙을 따른다는 것을 보였다(Pastor-Satorras and Vespignani, 2001). 무작위 네트워크와 다른 특성을 가지는 허브 네트워크는 연결선을 일부 허브 절점이 독점하고 있으며, 복잡계를 대표하는 특성을 가지고 있기 때문에, 다양한 대상을 모델링하기 위한 도구로 이용되었다(Caldarelli, 2007; Stauffer et al., 2003).

네트워크 분석 기법 연구는 동역학(dynamics) 현상 연구, 네트워크 구조(structure) 특성 및 이에 따른 진화현상(evolution) 연구로 크게 구분할 수 있다(Barrat et al. 2004). 네트워크 자체의 성질을 다루는 네트워크 구조 특성 연구는, 초기 네트워크 연결선수 분포의 불균일성을 측정하는 척도없는 네트워크 구조에 대한 연구가 많이 이루어졌으며, 주로 연결의 유·무만을 통해서 네트워크 구조를 기술하는 연구가 주류를 이루었다. 현재는 네트워크의 구조에 대한 일반적인 기술로서 절점들 사이의 각 연결 혹은 상호작용의 강도가 정량적인 가중치(weight)에 의해 결정되는 가중치 네트워크에 대한 연구가 이루어지고 있다. 또한 인터넷에서 데이터들의 전송속도, 항공망에서의 승객들의 수, 사회연결망에서의 인지정도, 세포 내의 신진대사망에서의 반응 등 가중치를 고려해야하는 네트워크들이 많이 존재하고 이러한 가중치 네트워크를 연구함으로써 네트워크 특성을 정량적 이해하는데 도움

이 되었다(Newman, 2006).

네트워크 진화를 다루는 연구는 사회연결망이 구성 원동력, 상호작용에 의한 네트워크 진화, 웹 페이지 형성 과정, 형성과정에서 발생하는 취약지점 등을 이해하는데 크게 관련이 있다. Lee 등은 병원균 발현과 전파 경로 추적을 척도없는 네트워크의 진화로 묘사 하였고, Shalathe and Jones는 네트워크를 구성하고 있는 작은 네트워크인 군집과 이들을 연결하는 군집 연결 절점으로 네트워크 진화를 나타내었다(Lee et al., 2013; Shalathe and Jones; 2010). 특히, 군집 연결 절점을 이용한 추적은 구조의 정보가 부족한 네트워크에서 진화와 그에 따른 구조 특성을 판단하는 것이 가능하게 하였다(Gong et al., 2013).

2.2 네트워크 구조 확률적 표현

네트워크는 절점 및 연결선으로 표현됨에 따라, 네트워크 구조는 절점들의 상호관계로부터 만들어진다(Ford and Fulkerson, 1956). 네트워크에서는 절점들의 상호관계를 절점 간 연결선으로 나타내고 있어, 절점의 연결선은 절점이 전체 네트워크에 미치는 영향력과 네트워크의 구조 변화 발생시킬 수 있는 정도 분석에 활용된다(Bonacich, 1987). 네트워크의 연결선 분포는 네트워크의 확장성 및 취약성 등의 특징을 분석할 수 중요한 지표로 활용될 수 있으며, 구조 특징을 이용한 네트워크 구분을 하는 도구로 사용되고 있다(Huberman and Adamoc, 1999). 네트워크는 크게 절점의 연결이 균등한 되어 있는 무작위 네트워크(random network)와 특정 절점이 연결선을 독식함에 따라 절점의 연결이 불균하게 되어 있는 척도없는 네트워크(scale-free network)로 구분하고 있다(Newman et al., 2002(a)).

무작위 네트워크는 각 절점들의 균등한 연결로 되어 있는 구조이며, 자동차 도로망과 같이 기하학 관계에 있는 절점들의 연결에서 주로 나타난다. 무작위 네트워크는 ER(Erdos-Renyi)이 수백개의 절점을 만들고, 2개 절점을 무작위 선택 후 연결하는 것을 반복하여 구성된 구조이다(Renyi and Erdos, 1959). 여러 절점에서 두 개의 절점을 선택하고 연결선을 잇는 과정을 반복하면, 무작위 네트워크는 절점의 균등한 상호관계로부터 연결선 수가 유사하게 나타난다. Hirsch(1980)은 무작위 네트워크를 구성하는 방법에 의해 특정 연결선 수가 가장 많이 나타나게 될 뿐만 아니라 연결선 분포가 특정 연결선 수를 중심으로 좌우 대칭이 됨에 따라 가우스 분포로 나타났다. 무작위 네트워크로 묘사되는 복잡한 현상은 가우스 분포를 이용하여 구성 요소간의 연결 특성을 표현 할 수 있을 뿐만 아니라, 구조의 확장 및 축소를 할 수 있다(Newman et al., 2002(b)).

척도없는 네트워크는 소수의 절점이 연결선을 상대적으로 많이 가지는 구조이며, 인터넷 망, 웹페이지, 항공망 등 구성요소들의 위상학적 관계에서 주로 나타난다. 척도없는 네트워크는 Jeong 등(1999)이 인터넷 망을 네트워크로 모사함에 따라 발견한 구조로써, 인터넷 망의 구성요소가 일부 구성 요소에만 연결되어 있는 특징이 있었다. Barabasi 등(1999)은 인터넷 망의 성장 과정을 관찰한 결과, 소수의 절점이 네트워크 전체의 연결선을 계속해서 독식하고 있었으며, 인터넷 망의 규모가 증가함에 따라 절점의 연결선 수 분포는 멱급수를 따르고 있음을 발견하였다. Albert 등(2002)은 웹페이지 및 항공망 등 복잡한 현상의 구성요소 관계를 관찰한 결과 물리적 거리에 제한이 없는 관계는 소수의 구성요소가 연결선을 많이 가짐에 따라, 척도없는 네트워크의 구조를 따르고 있는 것으로 나타났으며, 멱급수를 이용하여 소수의 구성요소가 연결선을 대부분 가지고 있는 것을 표현하였다.

네트워크는 절점의 상호관계에 따라 연결이 선호적으로 발생하게 되며, 선호적 연결이 되어 있는 절점들은 네트워크에서 군집(community)을 이루게 된다. 복잡한 현상을 모사한 네트워크는 소수의 절점이 연결선을 독식하는 군집과 다수의 절점의 연결선 수가 유사한 군집이 혼합되어 있는 구조로 이루어져 있었다(Lee et al., 2013). Lee(2014)는 소수의 절점이 연결선을 독식하는 부분과 다수의 절점에 포함된 연결선수가 유사한 부분이 혼재된 네트워크를 전처리 없이 연결선 수의 분포로 나타내려 하였으며, 감마분포의 형상모수(shape factor)가 멱급수 분포 형태에서 가우스 분포 형태까지 나타낼 수 있음을 활용하여 혼합된 네트워크의 연결선 수 분포를 나타냈다.

2.3 네트워크 취약성 해석

네트워크에서 취약성은 특정 절점 및 연결선이 제거됨에 따라 발생 가능한 지름 변화량, 군집의 변화량, 중심지 변화량 등을 의미하며, 취약성의 정도는 절점에 포함된 연결선 수의 차이에 따라 발생한 구조 불균등으로 네트워크에 따라 차이가 발생한다. 대표적인 예로 척도없는 네트워크는 허브와 군집 연결 절점을 포함하고 있기 때문에 절점당 가지고 있는 연결선의 빈도 차이가 발생하며, 외부 공격 및 연쇄적 현상에 대한 취약성은 무작위 네트워크보다 높았다(Barabasi et al., 1999). 척도없는 네트워크의 취약성 평가가 중요하게 부각된 사건은 2003년 미국 북동부 정전사태로써, 미국 북동부의 전력망은 다양한 경우의 수를 고려하여 기능을 유지할 수 있도록 설계되어 있었지만, 작은 마을로부터 발생한 정전의 확대에 인하여 결국 뉴욕 등 동부 지역 전체의 블랙아웃이 발생하였었다(Kang et al., 2004). 전력망과 같이, 작은 요소 변화로부터 전체 시스템의 기능 상실이 나타난 현상은 구조가 균등한 네트워크보다 구조가 불균등한 네트워크에서 커지는 것을 관찰할 수 있었으며, 취약성 연구에서는 구조 불균등을 반영할 수 있도록 절점의 연결선 수 분포 활용 방안을 제시하였다(Hayama et al. 2010; Inkpen and Tsang, 2008).

Albert 등은 무작위 네트워크와 척도없는 네트워크의 취약성 특징을 비교하기 위해서, 무작위 네트워크와 척도없는 네트워크를 대상으로 절점을 제거하고, 네트워크의 지름 변화를 관측하였다(Albert et al., 2000). 네트워크 취약성 분석 연구는 임의로 절점을 제거하는 경우, 중심성이 높은 절점을 순차적으로 제거할 경우 및 무작위 네트워크와 척도없는 네트워크 지름을 변화시키는 연구로 분류가능하다. 무작위 네트워크의 지름 변화는 절점의 제거 순서에 영향을 받지 않은 반면, 척도없는 네트워크의 지름 변화는 중심성이 높은 절점 제거 순서에 영향을 받는다(Carreras et al., 2001).

다중 연결된 시스템의 취약성 분석은 척도없는 네트워크와 무작위 네트워크로 모사하고 각 절점의 연결선 분포로부터 평가된다(Pastor and Vespignani, 2001).

Watts(2002)는 척도없는 네트워크와 무작위 네트워크의 취약성 평가 결과를 활용하여 복잡한 현상의 유지정도를 예측하였다. 복잡한 현상을 발생시키는 것으로 알려진 허브는 척도없는 네트워크에서 연쇄적 현상에 대한 취약성을 증가시키는 요인이며, 절점의 중심성 크기는 척도없는 네트워크의 연쇄적 반응을 고려한 취약성 평가에 활용된다(Caldarelli, 2007; Stauffer et al., 2003). Eagle 등은 척도없는 네트워크와 허브 절점을 활용하여 경제 활동에 참여하는 인간 관계를 네트워크로 모사했고, 중심성 정도를 분석하여 취약성과 경제 활성화의 관계를 도출하였다(Eagle et al. 2010). Im(2012)는 복잡한 현상인 무역이 여러 경제적 문제로부터 견딜 수 있는 정도를 설명하기 위해서 유럽 국가들의 무역을 척도없는 네트워크로 구성하고 네트워크 취약성 평가를 이용하여 무역 유지 정도를 분석하였다.

양적 크기가 증대하거나 감소하는 것을 반복하는 복잡한 시스템을 분석한 결과 네트워크의 구조 변화가 나타났으며, 복잡한 현상을 모사한 네트워크의 구조변화는 취약 지점 및 연쇄적 반응의 방향을 변화하고 있었다(Girvan and Newman, 2002; Newman, 2004; Reichardt and Bornholdt, 2004). 복잡한 현상의 양적 크기와 감소 현상은 인터넷 망 확장과 병원균 전파 등에서 잘 나타나고 있다(Haydon, 2003). Shu는 인터넷 망의 확장 관련 연구에서 다양한 공격 문제로부터 기능을 유지할 수 있는 네트워크를 제시하였으며, 병원균 전파 차단 연구는 구조 취약성을 감소시킬 수 있도록 확산억제 지점을 도출하였다(Eames, 2008; Shu, 2012). 두 연구의 공통점은 네트워크를 구성하고 있는 군집과 이들을 연결하는 군집 연결 절점, 중심성이 높은 절점을 토대로 구조 취약 지점을 분석하였다.

앞에서 언급한 다양한 용어 중 군집 연결 절점은 네트워크에서 중간규모 구조인 군집을 연결하는 통로 역할을 하는 지점이며, 중심성이 높은 절점은 네트워크에서 군집을 구성하는 기준이 되는 지점이다. Newman(2004)은 응집력 변화와 게임 이론 등을 이용하여 군집을 분석하였고 군집 연결 절점을 제시하였다. 군집과 군집 연결 절점은 척도없는 네트워크를 대표하는 페이스북, 트위터 및 전염병 전파에서 관측이 용이한 것으로 알려져 있다(Stephens, 2006). 따라서 군집 연결 절점과 중심성이 높은 절점은 네트워크의 확장 및 취약지점 분석에서 중요성이 높아지고 있다(Gilchrist, 2009).

대표적인 기법인 군집화 방법은 척도없는 네트워크를 대상으로 한 응집력(modularity) 분석을 이용하여 군집 연결 절점들의 위치를 찾았을 뿐만 아니라 하위 집단을 도출하였다(Gudkov and Nussinov, 2002). 군집 분석은 각 절점간의 연결선 빈도 분석을 통해서 연결선을 많이 가진 절점을 우선적으로 제거하고 소집단으로 구분한다. 이는 군집 내 절점들의 연결성은 높지만 군집과 군집을 연결하는 절점에 포함된 연결선의 빈도가 낮은 현상에 착안한 것이다(Girvan and Newman, 2004). Newman(2004)은 연결선을 제거하는 기존 방법과 반대로 유사한 특성을 가지는 절점들을 연결하면서 군집화 하는 방법을 제안하였으며, 기존 방법의 효율성을 개선하고자 하였다. 유사한 절점을 결합하는 방법은 네트워크에서 모든 절점들의 관계를 정의하고 하층 집단에서부터 상층 집단으로 점진적으로 군집을 진행하였다(Reichardt and Bornholdt, 2004).

군집 연결 절점을 찾는 대표적인 방법은 community bridge finder(CBF)와 bright-hub detector(BHD)이다(House et al., 2009; Xu et al., 2010). CBF와 BHD는 랜덤워크(random walk)를 활용하여 일부 모사된 네트워크의 경우에도 군집 연결 절점을 도출할 수 있었다(Salathe and Jones, 2010). CBF와 BHD는 특정 현상이 나타난 절점으로부터 현상이 발생할 수 있는 인접 절점까지 모든 경로를 찾아 각 방법이 가진 기준을 토대로 군집

연결 절점을 찾는 방법이다(Danon et al., 2011).

제3장 네트워크 구조 기반 취약성 해석 기법

3.1 네트워크 중심성 및 군집 분석

절점에 연결된 선의 분포 및 인접 절점 연결 형태는 네트워크의 취약성을 평가하고 네트워크의 거동에 영향력이 큰 지점을 분석함에 있어 중요하다. 네트워크 분석 기법에서는 절점에 연결된 선의 정도를 알아보기 위해서 절점의 연결정도와 사이정도 등을 산출하고 있으며, 네트워크에서는 절점에 연결된 선의 정도와 형태를 알아보는 것을 중심성 분석(centrality analysis)이라 한다.

연결정도(degree) 분석은 네트워크의 절점들이 얼마나 많은 연결선을 가지고 있는지를 측정하는 방법이다. 연결정도의 의미는 한 개인 혹은 지역이 많은 연결을 가질수록 더욱 많은 자율성과 권역을 가지는 정도이다. 연결정도 분석은 군집 범위에서 중심성이 높은 정도의 비교는 가능하지만 네트워크 범위에서 중심성이 높은 정도의 비교에는 한계가 있다. 연결정도를 측정하는 방법은 식 3.1이다.

$$C_p(p_k) = \frac{\sum_{i=1}^N a(p_i, p_k)}{N-1} \quad (3.1)$$

where, N : total number of nodes in network

a : value of edge between nodes, $0 \leq a \leq 1$

p : nodes

사이정도(betweenness)는 대상 절점이 인접 절점들을 연결하는 정도를 의미하며, 대상 절점을 경유하여 얼마나 많은 인접 절점이 연결되어 크기이다. 사이정도 분석은 한 절점이 네트워크 내의 다른 절점들 사이에 위치한 정도를 측정하는 방법이다. 사이정도는 한 절점이 인접 절점들 사이의 최단 거리를 연결하는 선이며, 사이정도 크기는 절점이 최단 경로위에 위치할수록 커진다. 네트워크에서 사이정도는 원활하게 소통해주는 역할을 평가함에 있어 활용된다. 사이정도를 측정하는 방법은 식 3.2이다.

$$C_B(v) = \sum_{s \neq v \neq t \in V} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}} \quad (3.2)$$

where, σ_{st} : total number of shortest paths

$\sigma_{st}(v)$: total number of shortest paths through v

위세정도(eigenvector centrality) 분석은 인접 절점의 연결정도가 얼마나 높은지를 측정하는 방법이다. 위세정도는 대상 절점의 연결정도에 의한 네트워크의 영향력과 인접 절점의 연결정도에 의한 네트워크 영향력을 동시에 고려한 크기이다. 위세정도 크기는 대상 절점이 연결정도가 높은 인접 절점과 연결되어 있는 것이 연결정도가 평균 정도인 인접 절점과 연결되어 있는 것 보다 커진다. 위세정도를 측정하는 방법은 식 3.3이다.

$$C_i = \frac{1}{\lambda} \sum_{j \in N(i)} A_{ij} C_j \quad (3.3)$$

where, λ : eigenvalue of node i

$N(i)$: subset of nodes connected node i

C_j : eigenvector between node i and node j

근접정도(closeness centrality) 분석은 대상 절점이 네트워크의 모든 절점과의 최단 경로의 합을 구하는 방법이다. 근접정도는 대상 절점이 인접 절점과 직접 연결이 많이 되어 있는지 정도를 나타내는 크기이다. 근접정도의 크기를 산정하는 방법은 식 3.4이다.

$$C(x) = \frac{1}{\sum_y d(y, x)} \quad (3.4)$$

where, $d(y, x)$: distance between node x and y

네트워크에서 군집은 상대적으로 연결의 밀도(density)가 높은 절점들의 집합이다(Fig. 3.1). 밀도는 네트워크의 완벽성을 표현하는 개념으로 총 연결선수와 가능한 총 연결선수의 비율이다. 군집은 네트워크의 중간 크기의 구성 요소이며 군집의 수와 군집에 포함된 절점에 따라 취약성 크기가 변한다. 군집 연결 절점은 군집과 군집을 연결하는 통로이며 절점들 보다 상대적으로 중심성 크기가 작지만 연쇄적 반응을 고려한 네트워크 취약성 정도를 결정하는 요인이다.

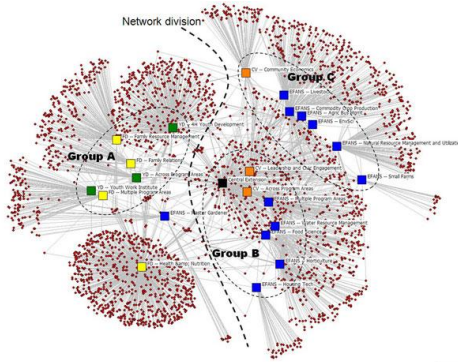


Fig. 3.1 Community and community bridge

Newman 2007

군집의 분석 방법은 최대 응집력(modularity maximization)과 최소 분리(minimum-cut method) 방법 등이 있다. 응집력에 의한 군집 분석은 임의로 나누고 밀도가 가장 큰 군집을 찾는 방법이며, 최소 분리에 의한 군집 분석은 네트워크를 최소한으로 분리할 수 있는 절점들의 집합을 구성하는 방법이다.

응집력을 활용한 군집 분석은 모든 절점을 각각의 군집을 만들고 두 개의 군집을 하나의 군집으로 합쳐본 뒤 응집력 차이를 계산하여 가장 큰 응집력 차이는 보인 두 군집의 합하여 하나의 군집으로 하는 과정을 반복하는 것이다. 응집력의 크기는 대상 군집과 인접 군집간이 가지고 있는 연결선의 차이 정도이며 대상 군집과 인접 군집이 포함한 연결선 과 인접 군집이 포함한 연결선 제곱의 차이들의 합이다(식 3.5).

$$Q = \sum_i (e_{ij} - a_i^2) \quad (3.5)$$

where, e_{ij} : fraction of edges with one end nodes in
community i and the other in community I
 a_i : fraction of ends of edges that are attached to node
in community j

응집력에 의한 군집 분석은 아래의 식 3.6과 같이 절점을 각 군집으로 이동시켜 응집력 크기 변화를 반복 측정하여 변화량이 큰 값을 선택하는 방법이다.

$$\Delta Q = \left[\frac{\sum_{in} + k_{i,in}}{2m} - \left(\frac{\sum_{tot} + k_i}{2m} \right)^2 \right] - \left[\frac{\sum_{in}}{2m} - \left(\frac{\sum_{tot}}{2m} \right)^2 - \left(\frac{k_i}{2m} \right)^2 \right] \quad (3.6)$$

where, \sum_{in} : summation of edge's weight in community

\sum_{tot} : summation of edge's weight in connected community

k_i : summation of edge's weight in node i

3.2 네트워크의 연쇄적 반응 경로 확률 분석

네트워크의 연쇄적 반응은 시스템을 구성하고 있는 특정 요소에서 발생한 현상이 인접 요소에서 나타나는 것을 네트워크로 모사한 것으로써, 복잡한 현상인 전염병 및 경제 위기의 확산 등을 분석하는데 활용되고 있다 (Carreras and Newman, 2001). 네트워크에서 연쇄적 반응의 경로 분석은 특정 절점에서 발생한 현상이 연결선을 통해 전달될 수 있는 절점을 찾는 방법으로써, 발생 절점으로부터 중심성이 높은 절점 및 군집 연결 절점으로 이동하여 인접 전체 네트워크로 확산된다고 가정한 방법이 주로 사용되었다 (Albert and Barabasi, 2002). 중심성이 높은 절점 및 군집 연결 절점을 활용한 방법은 연쇄적 반응의 주경로만 분석할 수 있어, 중심성이 낮거나 군집 연결 절점이 아닌 지점으로 확산되는 경우를 분석함에 있어 어려움이 존재한다(Youn, 2010). Lee(2014)는 발생 가능한 경로를 모두 고려하기 위해서 절점 및 연결선에 확률을 적용하였으며, 각 경로별 절점 및 연결선의 확률 크기를 컨볼루션(convolution)을 이용하여 하나의 확률 크기를 산출하였다.

확률을 고려한 연쇄적 반응 경로 분석은 개별 사상의 확률분포 함수를 결합하는 방법이 필요하다. 확률분포 함수를 결합시키기 위해서는 확률분포 함수를 이용하여 충분히 많은 수의 무작위 값을 생성시킨 후 이들을 더하는 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 이용할 수도 있으나, 이 방법은 많은 계산량을 발생시키므로 문제가 복잡해질수록 적용이 어렵다. 따라서 함수를 결합할 때 사용하는 컨볼루션을 이용하여 확률분포함수를 결합하는 방법이 제안되었다(Lee et al., 2014a).

컨볼루션은 두 함수가 있을 때, 이 중 하나를 반전 천이 시킨 뒤 반전시키지 않은 다른 함수와 곱한 값을 적분하여 나오는 면적으로 이루어진 새로운 함수를 만드는 연산자이다(O'Neil, 1963). 컨볼루션 기법은 두 개의 독립된 확률적 사상을 통합하여 새로운 사상으로 재해석하고 하나의 확률 사상으로 재 규격화 한다. 컨볼루션은 입력값을 y축으로 대칭이동한 후에 단계별로 출력의 확률값을 곱해나가는 방식으로 연산을 수행해 나가는 방법이다(Ringer, 1971; Burt and Garman, 1971). 시스템 입력신호를 확률분포라 하면 출력에 대한 확률적 연산에 의한 값은 특정시점에서의 입력신호를 기준으로 그보다 작은 $-\infty$ 까지 입력 신호 값의 합과 출력신호의 곱으로 하나의 확률분포를 만든다(식 3.7).

$$y(x) = \left(\int_{-\infty}^t I(\tau) d\tau \right) \times O(t) \quad (3.7)$$

where, $I(t)$: probability distribution of input

t : time

$O(t)$: probability distribution of output

본 연구에서는 절점의 영향력 전달 정도를 이용하여 네트워크 확장 지점을 해석하기 위해서 연결선의 전달 정도와 절점의 받아들일 수 있는 정도의 두 확률적 사상을 합성하는데 컨볼루션 기법을 적용한다. Fig. 3.2와 같이 기존의 시스템의 입력과 출력에 대한 새로운 확률분포로 주어진다. 네트워크 모델에서 절점으로 들어오는 연결선이 확률분포를 가지는 전달력(transmission, T)을 가지고 있고 절점이 받아들일 수 있는 정도(acceptance, A)를 가지고 있다면 컨볼루션 연산을 통해서 절점을 나가는 연결선인 영향력은 새로운 값을 가지게 된다.

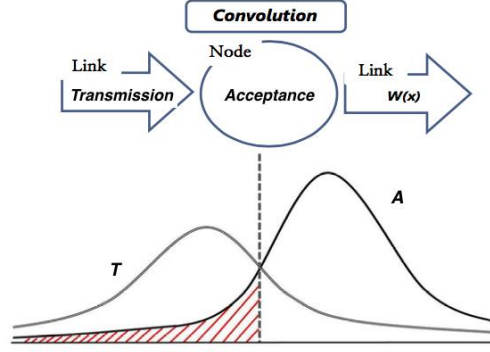


Fig. 3.2 Convolution in network

Lee, 2014

새로운 절점의 전달정도의 평균값은 절점의 전달정도와 수용정도에 대한 확률분포를 가우스 분포로 가정할 때 평균값을 대푯값으로 이용하면 전달정도와 수용정도의 차이와 같다. 새로운 절점의 전달정도 확률분포는 컨볼루션을 이용하여 전달정도와 수용정도의 확률분포를 하나로 재 규격화 할 수 있다(식 3.8). 즉, 새로운 절점의 전달정도는 영향력 전달정도와 수용정도의 확률분포가 0보다 큰 영역을 컨볼루션을 활용하여 확률적 범위로 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \int_{-\infty}^{\infty} W(x)dx &= \int_{-\infty}^{\infty} T(x) \times A(x)dx \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^x T(\tau) d\tau A(x) dx \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^0 T((\tau+t) A(x) dt dx \\
 &= \int_{-\infty}^0 T(t) \otimes A(-t) dt
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

where, T : probability distribution of transmission

A : probability distribution of acceptance

W : probability distribution of transmission in new node

확률 및 컨볼루션을 이용한 연쇄적 반응의 경로를 분석하기 위해서는 특정 절점에서 발생한 현상이 전파 가능한 다양한 방향을 설정하여야 가능하다(Sporns, 2011). 앞서 제시한 바와 같이 연쇄적 반응 경로는 중심성이 높은 절점 및 군집 연결 절점 등이 있지만, 다양한 경로를 제시하고 있지 않아, 컨볼루션 및 확률을 토대로 한 방법에 활용하는데 제한사항이 있다(Scott, 2012; shutter, 2012; Trade, 2011). Gong 등(2013)은 가중치 및 방향을 고려하지 않은 연결선으로 이루어진 네트워크에서 일부 절점 및 연결선의 정보만으로 연쇄적 반응 경로를 분석하였으며, 모든 경로를 고려할 수 있도록 CBF 방법을 제시하였다(Fig. 3.3).

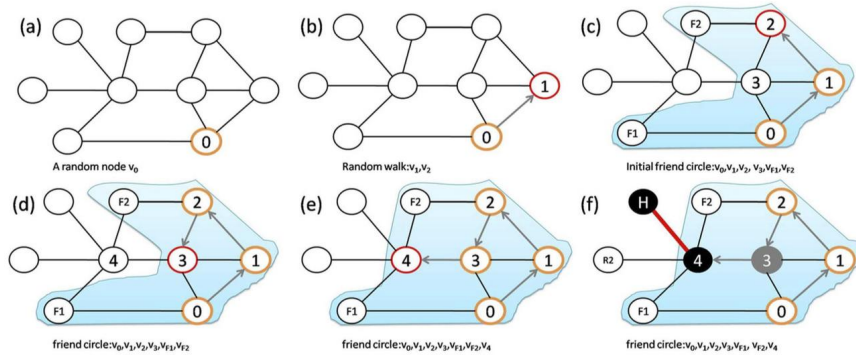


Fig. 3.3 Schematic illustration of community bridge finder

Gong et. al, 2013

본 연구에서는 가중치 연결선을 고려하고, 여러 경로를 대상으로 연쇄적 반응이 나타날 수 있는 가능성을 분석할 수 있도록, 기존 방법인 CBF에 확률을 적용하여(Probability Community Bridge Finder, PCBF) 연쇄적 반응 경로를 분석하였다. PCBF에서 절점의 수용 정도를 나타낸 확률은 네트워크의 최대흐름 기법(maxflow analysis)으로 도출되며 절점들의 연결 단계 별

경로 수와 총 경로 수의 비율(식 3.9)로 산출한다. 그리고 각 경로의 확률 크기를 이용하여 확률분포를 구성하였으며, 확률분포의 형태는 가우스 방정식으로 하였다. PCBF는 이미 네트워크 연쇄적 반응에서 절점에 주어진 현상에 대한 크기가 연결선을 통해 다른 절점으로 동일한 크기가 전달되지 않는 것을 활용하여(Newman and Girvan 2003), 연결선의 가중치를 확률에 반영하였다.

$$p_{j,1} = \frac{\maxflow_{ij,1}}{\sum_{k=1}^n \maxflow_{ij,k}} \quad (3.9)$$

where, p : probability of acceptance

k : number of nodes between path

\maxflow_{ij} : possibility routes between i node and j node

PCBF는 발생 절점(Fig. 3.4의 S 절점)과 인접 절점(Fig. 3.4의 T 절점)을 선정하고 두 절점 사이에 위치한 절점들(Fig. 3.4의 i, j, k 절점)을 나열한다. i 지점의 발생 정도인 확률분포는 최초 발생 지점인 S 와 연결된 절점인 i 의 전달 및 수용 정도의 확률분포를 컨볼루션 하여 산정한다. T 의 군집 연결 절점 가능성은 T 절점의 수용 정도 확률분포와 S, i, j 및 S, i, k 의 합으로 산정된 발생 정도 확률분포를 컨볼루션으로 산정한 확률분포이다. 중간 과정에서 영향력 확률이 0이 되면 계산을 중단한다.

Fig. 3.4 A 표시는 일반적인 두 절점 사이의 발생 및 수용 정도의 확률 분포를 컨볼루션을 이용하여 하나의 발생 정도 확률분포를 도출하는 과정이다. 식은 아래와 같이 된다.

$$PDF_{S_j}[t_{S_j}] = conv(PDF_S[T_S], PDF_i[t_i]) \quad (3.10)$$

where, PDF : probability distribution of nodes
 $conv$: convolution

식 3.11의 연산은 하나의 절점에서 분기점이 생기고 합일점이 만들어지는 병렬연결을 처리하는 것이다. 본 연구에서는 하나의 절점에서 분기점과 합일점 사이에 하위 병렬연결이 있는 경우 영향력을 확률적으로 산정하기 위해서 병렬연결을 직렬연결로 축약하는 방법을 사용하였다. 영향력이 전달될 때 가장 영향력이 큰 지점이 전달을 결정한다. 이를 활용하면 병렬로 연결된 절점들의 영향력 전달 확률은 하나의 절점이 영향력 전달 확률이 되고 다른 절점들이 영향력을 모두 전달할 경우 확률은 영향력 확률의 합의 곱으로 정해진다. 즉 두 절점 j, k 에 관해 확률밀도함수와 확률누적함수를 이용하여 병렬로 연결된 n 절점의 영향력 전달 분포를 하나의 영향력 전달 분포로 나타내면 아래의 식과 같이 된다.

$$CDF[t] = \int_0^t PDF[t]dt \quad (3.11)$$

$$PDF_{jk} = CDF_k[t] \times PDF_j[t] + CDF_j[t] \times PDF_k[t] \quad (3.12)$$

이를 n 개의 병렬로 연결한 절점에 대해 확장하면 식 3.13을 얻을 수 있다. PCBF는 대상 군집 연결 절점을 식 3.13을 이용하여 도출하고, 각 대상의 크기를 비교하여 군집 연결 절점을 찾는 방법이다.

$$\begin{aligned}
 PCBP_n &= PDF_{1,\dots,n} \\
 &= CDF_1[t] \times \dots \times CDF_n[t] \times \sum_{k=1}^n \frac{PDF_k[t]}{CDF_k[t]} \\
 &= \sum_{k=1}^n \left(\prod_{h=1}^n (CDF_h[t]) \right) \frac{PDF_k[t]}{CDF_k[t]}
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

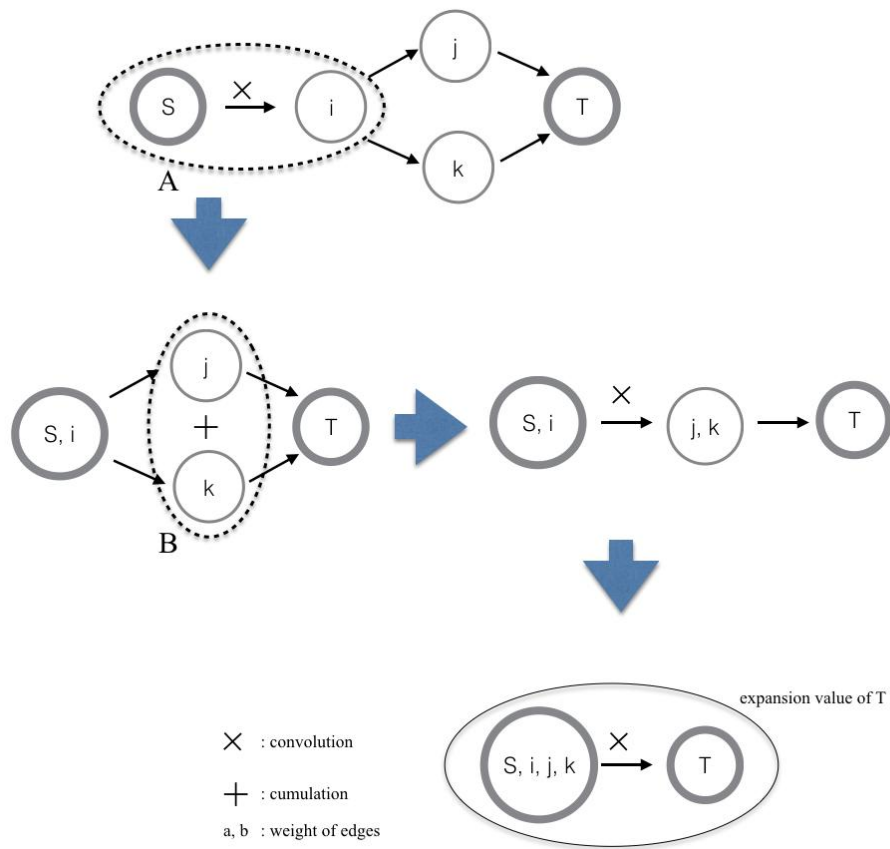


Fig. 3.4 Method of vulnerability node analysis using probability and convolution

PCBF는 가중치 연결선으로 이루어진 네트워크에서 특정 절점에 발생한 현상이 확산되는 연쇄적 반응 경로를 확률 분석하는 방법으로써, 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation, MCS)에 의한 연쇄적 반응의 경로와 PCBF의 연쇄적 반응의 경로를 비교함으로써, 활용이 가능한지를 평가하였다. MCS는 분석적 해를 통한 검증이 어려울 경우 난수에 가까운 수치적 해법으로 검증을 하는 방법으로 알려져 있다(JM Burt et al., 1971; Romualdo Pastor-Satorras and Alessandro Vespignani, 2000). MCS로부터 발생한 난수는 1,000,000회 반복 계산한 값이며, 식 3.14는 MCS 난수를 이용하여 군집 연결 절점 도출 방법이다. 활용가능성에 사용된 다중 연결 시스템은 절점 9개, 연결선 13개로 구성되었으며, 3개의 연결선을 가진 절점과 5개의 연결선을 가진 절점의 빈도가 높았다(Fig. 3.5).

$$W_{positive} = \frac{n_p}{1,000,000} \quad (3.14)$$

where, n_p : frequency of expression

PCBF에 의한 연쇄적 반응 경로의 도출은 발생 절점으로부터 모든 경로의 분류와 발생 절점으로부터 각 절점의 연쇄적 반응의 수용정도의 확률크기가 필요하다. 네트워크에서 특정 현상의 발생지점은 Fig. 3.5의 1번 절점이며, 연쇄적 반응은 모든 인접 절점으로 확대된다. 예를 들어 발생 지점은 1번이며, 인접한 2번 3번 절점으로 연쇄적 반응이 확대되며, 2번 절점은 인접 절점인 4번 5번으로 연쇄적 반응을 전달하게 된다. 따라서 Fig. 3.5의 1번 절점은 연쇄적 반응이 최초로 발생하게 되면 연쇄적 반응은 2번 및 3번 절점으로 확대되어 4, 5, 6, 7번 절점은 군집 연결의 가능성이 있게 된다. 연쇄적 반응의 경로 구분은 최초 발생 절점과 군집 연결 절점 사이에 거쳐야하는 절점의 수를 이용하여 구분하였다. 그 결과, 1번인 발생 절점으로부터 4번 절점은 1개의 경로를 가지고 있으며, 7번 절점은 총 4개의 경로를 가지는 것으로 나타났다.

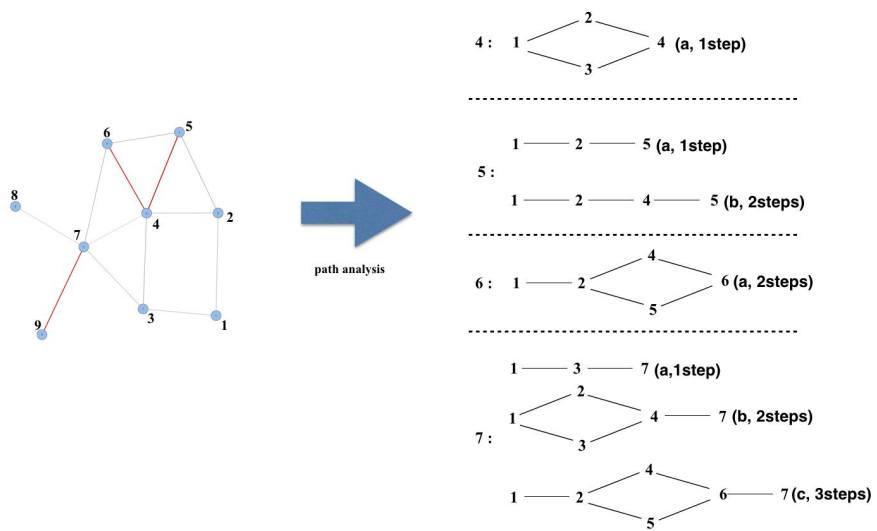


Fig. 3.5 Method of path analysis from origin node

절점의 연쇄적 반응 수용 정도는 최초 발생 절점에서 분석 대상 절점까지 연결 가능한 모든 경로 개수와 각 단계별 연결 가능한 모든 경로 개수의 비를 이용하여 산정하였다. 경로의 구분은 경유 절점과 연결선 개수로 구분이 가능하며, 연결선 개수만을 이용하여 경로를 분류하였다. 단계별 연결은 최초 발생 절점으로부터 분석 대상 절점 사이의 연결선 개수를 고려한 경로를 의미한다. 예를 들어, 최초 발생 지점인 1번 절점으로부터 7번 절점까지 경로는 연결선 개수가 2, 3, 4, 5인 것으로 분류가 가능하며, 2단계 경로는 최초 발생 지점으로부터 분석 대상 절점까지 연결선 개수가 2인 것이다. 그 결과 2번과 3번 절점은 평균 1.00, 표준편차 1.02, 4번 절점은 평균 2.00, 표준편차 1.23, 5번 절점과 7번 절점은 평균 2.50, 표준편차 1.62로 나타났다(Table 3.1).

Table 3.1 Gaussian distribution of nodes for finding community bridge

Node	Mean	Std.
2	1.00	1.02
3	1.00	1.02
4	2.00	1.23
5	3.00	1.62
6	3.00	2.72
7	3.00	1.62

PCBF는 연쇄적 반응 경로 및 각 절점의 수용 정도를 반영하여 Fig. 3.6의 결과를 도출하였다. Fig. 3.6의 각 절점의 값은 군집 연결 절점 가능성을 나타내는 것이며, 네트워크에서 연결선의 가중치 유무에 고려하여 연쇄적 반응의 방향을 도출하였다. Fig. 3.6에서 붉은 색 화살표는 기존 방법으로 연쇄적 반응의 경로를 분석한 결과이며, 검은 색 화살표는 PCBF로 연쇄적 반응의 경로를 나타낸 것이다.

가중치 연결선이 없는 다중 연결 시스템에서 PCBF에 의한 연쇄적 반응 경로를 분석 결과, 4번 절점 40.37%, 5번 및 7번 절점 71.33%, 6번 절점 21.92%로 나타났다. 가중치 연결선으로 구성된 네트워크를 대상으로 한 PCBF 분석 결과, 연쇄적 반응 경로는 4번 절점 35.32%, 5번 절점 73.78%, 6번 절점 10.48%, 7번 절점 70.84%였다. 2번과 3번 절점은 최초 발생 절점으로부터 직접 연결되어 있기 때문에 연쇄적 반응 경로에서 배제한다. 가중치가 없는 연결선으로 구성된 네트워크의 연쇄적 반응 경로는 7번 절점으로, 기존 방법인 CBF의 분석 결과와 PCBF 분석 결과가 동일하였다. 그러나 5번 절점은 PCBF에 의해 도출된 연쇄적 반응 경로이며, 가중치 연결선 네트워크의 경우, 5번 절점이 연쇄적 반응 경로로써 가능성이 가장 큰 것으로 나타났다.

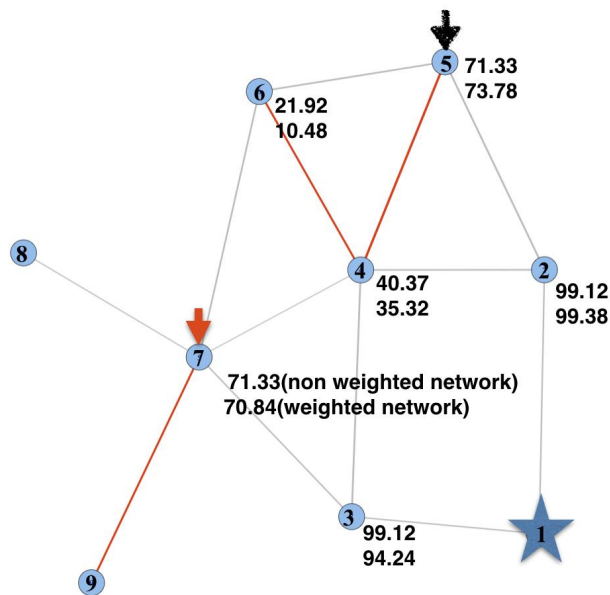


Fig. 3.6 Community bridge by PCBF and CBF

네트워크에서의 연쇄적 반응 경로는 PCBF 및 CBF에 의해 차이가 발생함에 따라, MCS를 이용하여 네트워크의 연쇄적 반응 경로를 분석하였다. PCBF와 MCS를 적용한 네트워크는 Fig. 3.2이며, 1번 절점을 최초 발생 지점으로 하여 연쇄적 반응 경로를 도출하였다. Table 3.2는 가중치 연결선으로 구성된 네트워크와 가중치 연결선을 고려하지 않은 네트워크를 대상으로 연쇄적 반응 경로를 도출한 결과이다. PCBF와 MCS에 의한 연쇄적 반응 경로는 유효숫자 5자리까지 비교하였다. MCS의 상대오차 방법에 따라 산출한 오차율은 가중치가 없는 네트워크의 경우 4.71%이며 가중치 네트워크의 경우 오차율 7.25%이다. 따라서 PCBF를 이용하여 분석한 네트워크의 연쇄적 반응 경로는 MCS와 비교한 결과 유효한 것으로 나타났다.

Table 3.2 Comparison of community bridge by PCBF and MCS

node	non-weighted network		weighted network	
	PCBF	MCS	PCBF	MCS
2	99.12397	99.12729	99.38745	99.38099
3	99.12397	99.12757	94.24312	94.24974
4	40.37917	40.37132	35.32832	35.32234
5	71.33203	71.33979	73.78579	73.78198
6	21.92477	21.92998	10.48952	10.48223
7	71.33203	71.30908	70.84282	70.84267

3.3 네트워크 구조 취약성 확률 해석

네트워크는 절점 및 연결선을 구성요소로 하고 있어, 네트워크 구조인 절점들의 관계는 절점과 절점 사이에 연결선으로 나타내고 있다(Barabasi et al., 1999). 절점의 연결선 수 빈도는 모든 절점들의 연결선 수가 동일한지 여부나 일부의 소수 절점이 연결선 수를 많이 가지고 있는지를 확률 분포로 나타내고 있다(Newman, 2001). 따라서 절점에 포함된 연결선 수의 확률 분포는 절점과 절점 사이의 연결선으로 표현된 네트워크 구조를 많은지 등을 나타내게 된다.

네트워크의 구조 변경은 절점 사이의 관계가 바뀌게 되는 것을 의미함에 따라, 하나의 절점과 인접 절점 사이에 존재하고 있는 절점 및 연결선의 수가 변하게 된다(Newman et al., 2002). 네트워크에서는 절점들 사이에 위치해 있는 절점 및 연결선 수를 연결 경로로 나타내고 있으며, 연결 경로상의 연결선의 수 및 절점이 많아지는 것은 네트워크에서의 거리가 멀어지게 된다(Newman, 2003). 즉, 네트워크의 연결 경로가 길어지게 되면 현실에서 물질의 수송, 정보의 전파, 관계의 형성 등이 어려워지며, 네트워크에서는 연결이 멀어지는 것과 연결이 끊기는 것 정도를 취약성으로 나타내고 있다. Fig. 3.7의 A 구조는 연결선이 많은 절점이 제거되었을 경우, 나머지 절점의 연결 경로가 사라지게 되며, B 구조는 하나의 절점이 제거 되어도 나머지 절점이 기존과 같이 연결되어 있게 된다. 네트워크의 취약성은 절점이 제거 되어도 연결 경로가 늘어나지 않으며, 기존과 동일하게 절점들의 연결이 지속되는 것 정도를 나타내는 것으로서, 네트워크에서는 A 구조가 B 구조보다 취약성이 크게 된다. 따라서 연결선 수의 확률 분포는 네트워크 구조를 나타낼 수 있으며, 네트워크의 취약성 요소인 연결 경로는 네트워크의 구조 중 일부로써, 연결선 수의 확률 분포와 관계를 나타낼 수 있다.

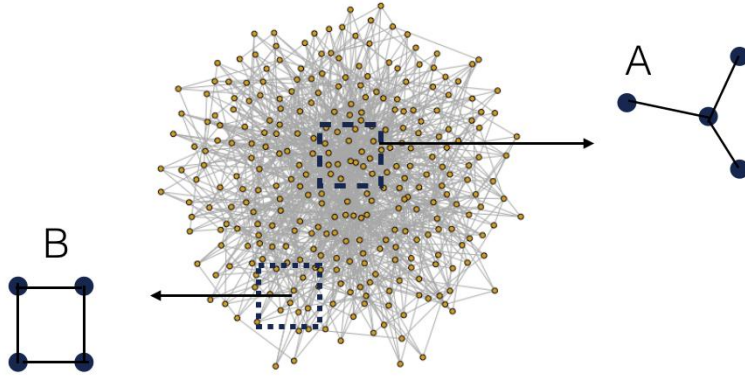


Fig. 3.7 Determinants of network structure

감마 분포(식 3.15)는 다양한 확률분포를 나타낼 수 있는 식이며, 지수 분포나 가우스 분포 등의 매개변수에 대한 켈레 사전 확률분포로 사용하고 있다(Choi, 1994). 감마 분포의 확률분포 형태는 형상모수 및 크기 모수를 이용하여 나타낼 수 있으며, 이를 이용하여 지수 및 가우스 분포를 나타낼 수 있다(Minka, 2002).

$$f(x; k, \theta) = x^{k-1} \frac{e^{-x/\theta}}{\theta^k \Gamma(k)} \quad (3.15)$$

where, k : shape factor

θ : scale factor

감마 분포의 형상모수와 크기 모수를 이용하여 먹급수 분포, 가우스 분포, 먹급수와 가우스 분포의 결합 형태를 나타낼 수 있다. Fig. 3.8에서 먹급수 분포는 형상모수의 크기가 1인 감마분포로 표현이 가능하며, 가우스 분포는 형상모수의 크기가 3인 감마 분포로 나타낼 수 있다(Friedman et al., 2006). 또한 감마 분포의 형상모수의 크기가 1, 크기 모수가 먹급수 계수의 역수일 때 먹급수 분포가 되며 감마 분포의 형상모수와 크기 모수를 통해 카이제곱 분포 또한 구성할 수 있다(Lee, 2014). 형상모수의 크기는 커질수록 먹급수 분포에서 가우스 분포로 형태가 바뀌며, 분포 좌우의 꼬리의 형태는 크기 모수의 값에 의해 결정된다(Wright et al., 2014).

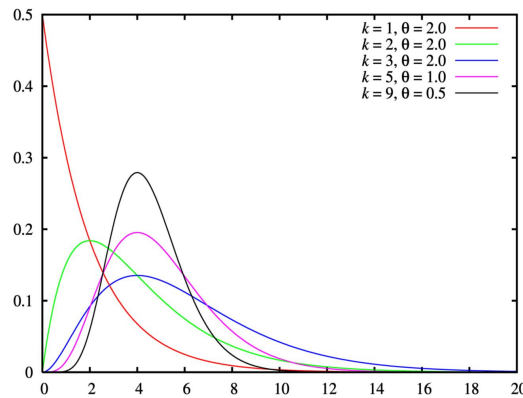


Fig. 3.8 Shape factor and scale factor by distribution type

Lee, 2014

무작위 네트워크는 ER(Erdos-Reny)이 네트워크의 진화를 양상을 살펴 보기 위해서 절점들의 임의적 선택을 하고, 선택한 절점의 연결 구성하였다 (Renyi et al., 1959). ER은 특정 개수의 절점이 존재하는 네트워크에서 임의로 2개의 절점을 무작위로 뽑고, 그 두 절점 사이에 연결선이 없으면 새로운 연결선을 잇고, 연결선이 있으면 또 다른 2개의 절점을 뽑는 것을 반복하였다(Beauchamp, 1965). 그 결과 무작위 네트워크 연결선의 분포는 기댓값은 식 3.16로 표현되고 절점의 연결선 빈도가 가우시안 분포를 따르

게 되었다(Bonacich, 1987).

$$\langle L \rangle = pN(N-1)/2 \quad (3.16)$$

where, N : total number of nodes in network

L : number of edges in network

p : probability of edges among nodes

ER은 해석적으로 절점 사이의 연결선이 있을 확률이 네트워크의 총 절점과 연결선의 비례임(식 3.17)을 발견하였고, 이를 토대로 총 연결선수의 기대치는 식 3.18임을 나타내었다. 그 결과 한 절점에 연결된 평균 연결선수는 식 3.19로 나타난다.

$$p(N) = 2 \langle L \rangle / N \quad (3.17)$$

$$\langle L_c \rangle \approx N/2 \quad (3.18)$$

$$\langle k \rangle = 2 \langle L \rangle / N \quad (3.19)$$

무작위 네트워크의 연결선수 분포는 가우스 함수를 따르고 있는 것으로 나타났다(Hirsch, 1980). 네트워크에서 정해진 수의 절점이 있고 어떤 한 절점은 다른 절점들과 총 절점수보다 1개 작은 수의 연결이 가능하다. 각각의 연결선은 절점에 연결될 확률로 존재할 경우 특정 절점이 연결될 확률은 식 3.20과 같이 주어진다.

$$P(k) = \binom{N-1}{N} p^k (1-p)^{N-1-k} \quad (3.20)$$

where, P : distribution of edges in network

N : total number of nodes in network

p : probability of edges among nodes

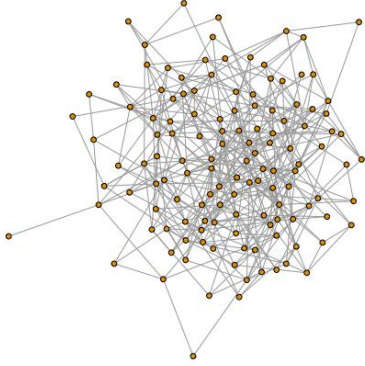
k : nodes with edge

식 3.20에서 절점 사이의 연결선이 있을 확률은 네트워크의 총 절점의 수가 매우 크게 되면 매우 작아지게 되면 식 3.21과 같이 가우스 분포를 따르게 된다.

$$P(k) = e^{-pN} \frac{(pN)^k}{k!} = e^{-\langle k \rangle} \frac{\langle N \rangle^k}{k!} \quad (3.21)$$

도로망은 교체지점을 절점으로 하고 도로를 연결선으로 하여 네트워크로 모사하면 Fig. 3.9(a)로 표현된다(Gansner and North, 2000). 다음의 네트워크의 절점에 따른 연결선의 분포는 Fig. 3.9(b)와 같이 가우스 분포로 나타난다. 특히, 다음의 네트워크는 도로망 등 기하학적 관계를 토대로 발생하고 있는 복잡계 현상을 표현하고 그에 따른 특징을 관측함에 있어 중요한 틀을 제공한다(Firedman, 2004). 절점의 연결선 빈도가 가우스 분포인 Fig. 3.9의 무작위 네트워크는 형상모수 6.65, 크기 모수 1.07인 감마 분포로 나타난다.

(a) network structure



(b) gaussian distribution

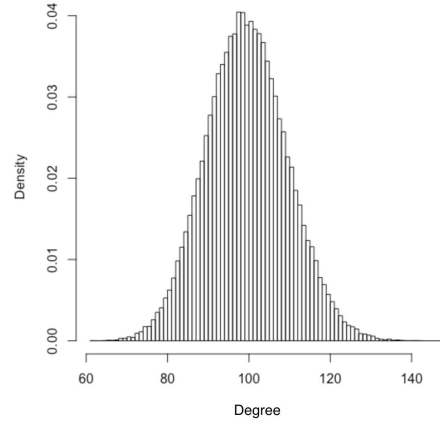


Fig. 3.9 Random network and distribution of edges

척도없는 네트워크는 복잡한 현상에서 나타나는 특정 절점이 연결선을 독식하는 형태이며 전력망, 선충(c.elegans)의 신경망, 영화배우 연결망 등에서 존재가 알려지기 시작하였다(Barabash et al., 1999). 척도없는 네트워크는 인터넷과 웹사이트를 조사하고 이들이 특정 절점에 연결선이 집중되고 있는 형태임을 밝혀졌다(Albert et al., 2000). 웹 사이트를 분석한 결과, 절점의 연결선 분포는 식 3.22와 같이 멱급수 분포를 따르고 있음을 증명하였다(Barabashi et al., 2004).

$$P(k) \sim k^{-\gamma} \quad (3.22)$$

where, P : probability of edge among nodes

k : edges in network

Barabasi(2000) 등은 척도없는 네트워크를 기본으로 하여 임의적으로 만들 수 있는 모델을 제시하고, 네트워크의 진화 특징을 분석하였다. 특히, 단위시간당 한 개의 절점이 새로 생겨난다고 가정하여 일정 시간 후 네트워크에 존재하는 총 절점 수는 시간과 동일하다. 둘째로 새로 생겨난 절점은 특정수의 연결선을 기존의 절점에 연결시킨다. 또한 Albert(2002) 등은 연결되는 절점을 무작위로 선택되는 것이 아니라 그 시간에 존재하는 각 절점의 연결선수에 비례하여 선택하도록 하였으며, 척도없는 네트워크는 선호적 연결을 하고 있는 것으로 밝혀졌다.

Fig. 3.10(a)은 척도없는 네트워크를 나타낸 것이며, Fig. 3.10(b)은 절점의 연결선 수의 빈도를 분포로 나타낸 것이다. 선호적 연결이 많은 절점은 네트워크의 구조적 불균형을 발생시켰고, 복잡한 현상을 분석 연구에서는 이를 활용하여 여러 현상을 설명할 수 있었다(Butts, 2008). 척도없는 네트워크의 절점에 연결된 선의 분포는 감모 분포의 형상모수 1.81로 나타낼 수 있다(Lee, 2014).

(a) scale-free network structure (b) exponential distribution

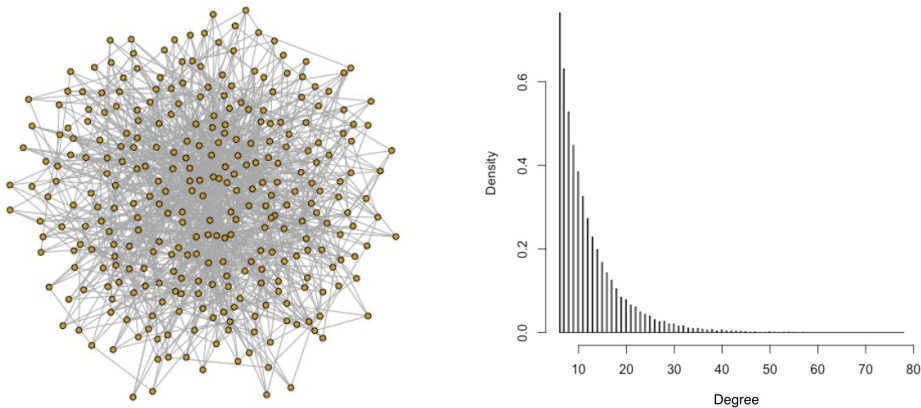
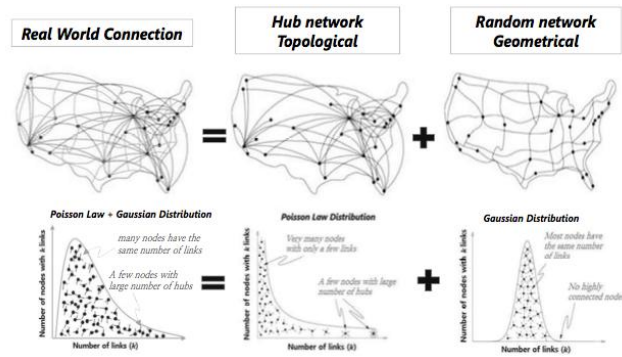


Fig. 3.10 Scale-free network and distribution of edges

다중 연결로 이루어져 발생하는 복잡한 현상은 척도없는 네트워크 및 무작위 네트워크 하나만으로 나타나지 않는 것으로 알려져 있다(Barabasi et al., 2002). 네트워크에서의 연결선 분포는 구조, 취약성, 진화 등을 이해함에 있어 활용된다. 그러나 척도없는 네트워크와 무작위 네트워크로 묘사되지 않는 복잡한 현상은 네트워크 분석 기법을 이용하는 것에 한계가 있다(Lee et al., 2013). 감마 분포는 척도없는 네트워크와 무작위 네트워크의 특징이 동시에 나타나는 네트워크를 연결선 분포로 설명하기 위해서 활용되었다(Lee, 2014).

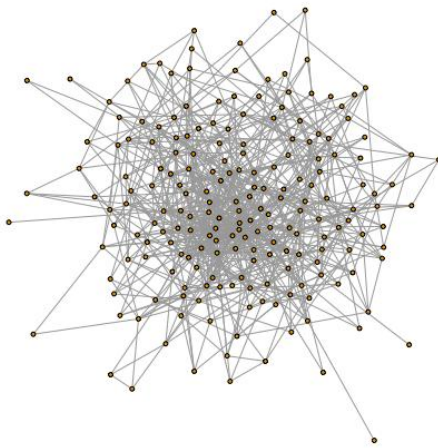
Fig. 3.11(b)는 Fig. 3.9(a)와 Fig. 3.10(a) 네트워크의 특징을 동시에 가지고 있다. Fig. 3.11(a)인 네트워크는 Fig. 3.9(a)인 무작위 네트워크보다 중심부에 연결선을 독식하는 절점들이 존재하고 있다. Fig. 3.11(b)의 연결선 분포는 가우스 분포와 멍급수 분포 사이의 형태로 나타났다. Fig. 3.11(c)의 형상모수는 4.03이며 무작위 네트워크의 형상모수보다는 작았고 척도없는 네트워크의 형상모수보단 크다.

(a) real network configuration



Barabasi, 2002

(b) real network structure



(c) gaussian distribution

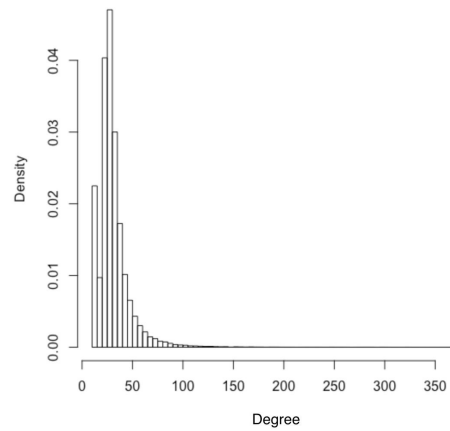


Fig. 3.11 Real network and distribution of edges

네트워크의 취약성 평가는 특정 절점을 제거하고, 발생할 수 있는 절점의 연결선 수 분포 변화와 지름 변화량 등 구조의 변화를 산출하면서부터 시작되었다(Albert et al., 1999). 네트워크의 취약성 정도는 네트워크가 외부 공격 혹은 내부적 문제에 의한 절점 및 연결선이 제거 되었을 경우, 발생하는 네트워크의 구조 변화를 측정한 것이다(Barabasi et al., 2000). 척도없는 네트워크와 무작위 네트워크는 절점 제거에 따른 취약성의 평가가 이루어져 있어, 제거하는 절점의 연결선 수 정도에 따른 취약성 변화 예측이 가능하다(Albert et al., 2000). 그러나 대부분의 복잡한 문제를 모사한 네트워크는 무작위 및 척도없는 네트워크의 구조 특징이 동시에 나타나고 있어(Lee, 2014), 모사한 네트워크의 취약성 평가는 절점 제거 및 구조 변화를 측정하는 여러 방법을 이용하여 반복 계산이 필요로 한다(Bell et al., 2017).

네트워크의 취약성 및 구조 특징은 절점의 연결선 수 분포에 따라 결정됨에 따라, 네트워크 구조 특성을 표현한 연결선 수의 확률분포와 절점의 연결 구조에 따른 취약성을 비교하였다. 네트워크 연결선 수의 확률분포는 무작위 네트워크의 구조를 나타내는 가우스 분포와 척도없는 네트워크의 구조를 나타내는 멱급수 분포의 혼합된 형태를 나타낼 수 있는 감마분포를 이용하였으며, 감마분포에서 확률 분포 형태를 결정하는 형상모수의 크기로 네트워크 구조를 나타냈다. 예를 들어, 무작위 네트워크에서 연결 구조는 각 절점에 포함된 연결선 수가 동일한 형태로서, 절점의 연결선 수는 가우스 분포를 따르고 있어, 형상모수는 6~8의 값을 나타낸다. 또한 척도없는 네트워크는 일부 절점에 연결선이 집중되는 불균등한 구조로서, 네트워크의 연결선 수의 빈도는 멱급수 분포를 따르고 있으며, 형상모수는 1~2의 값을 나타낸다. 무작위 네트워크 및 척도없는 네트워크가 혼합되어 나타나는 네트워크 구조는 기본이 되는 두 네트워크의 비중에 따라 형상모수가 2~6의 값으로 산출되었다(Fig. 3.12).

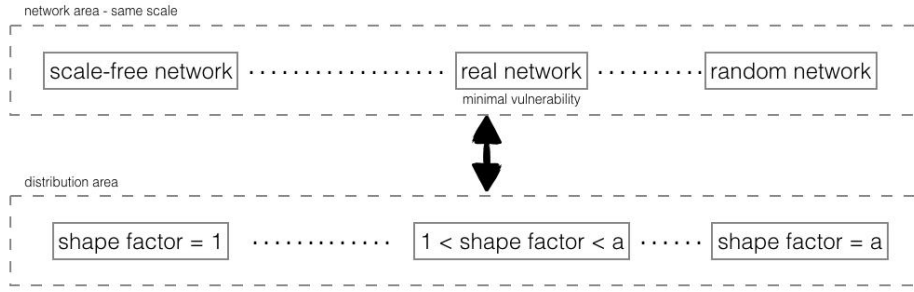


Fig. 3.12 Finding minimal vulnerability network feature using edge distribution

취약성 평가는 실세계를 모사한 무작위 네트워크와 척도없는 네트워크를 혼합한 네트워크를 대상으로 실시하며, 혼합된 비율에 따른 구조 특징은 형상모수와 취약성을 산출하였다(Fig. 3.13). 취약성 평가는 절점을 제거함에 따라 발생하는 구조 변화를 측정된 결과이며, 구조 변화량은 네트워크의 지름 및 중심성과 절점의 불안정성을 값을 이용하였다(식 3.24). 각 네트워크의 취약성은 모든 절점을 무작위로 제거하고 이에 따른 연결정도 및 사이정도인 중심성을 측정한다. 그리고 연결정도 및 사이정도 변화량을 기준으로 절점을 순차적으로 제거하고 이에 따른 네트워크 지름 변화량 비율을 측정하였으며, 모래 사태에 의한 절점의 불안정성을 계산한다. 본 연구에서의 네트워크 취약성은 네트워크의 평균 중심성 및 지름의 변화량과 절점의 불안정성 변화량의 평균값을 측정하여 가장 큰 값으로 한다. 네트워크의 공격 정도를 나타내는 절점 제거는 동시에 1개에서부터 10개까지 한다.

$$vul = \max\left(\frac{(\Delta D + \Delta B + \Delta BTW)}{3}\right) \quad (3.23)$$

where, ΔD : diameter variation

ΔB : betweenness variation

ΔBTW : instability variation

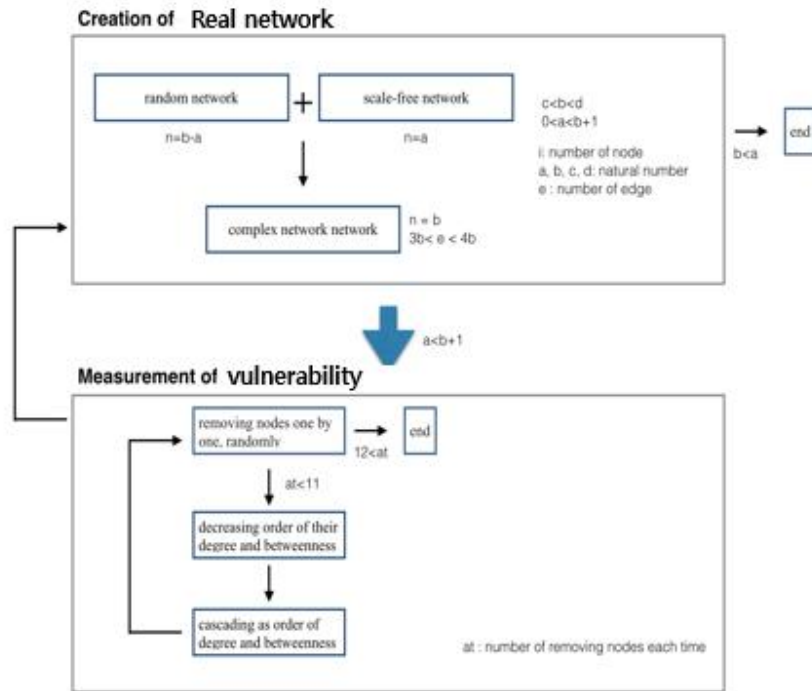


Fig. 3.13 Flowchart to develop vulnerability evaluation method using gamma distribution

무작위 및 척도없는 네트워크를 혼합한 구조에서 형상모수 및 취약성의 상관관계는 네트워크의 크기 및 연결 구조의 변화로 구분하여 비교하였다. 연결 구조에 따른 비교는 총 200개의 혼합 비율이 다른 네트워크를 대상으로 산출한 형상모수 및 취약성의 관계를 분석한 것이다. 다중 연결 시스템의 크기는 절점 및 연결선 개수에 의해 결정되며, 크기를 증가시키는 것은 절점 및 연결선의 개수를 늘려가는 것을 의미한다. 단 네트워크의 크기 변화는 동일한 구조에서 절점 및 연결선의 개수를 증가시키는 것으로, 형상모수는 네트워크의 크기에 상관없이 동일하다. 네트워크 크기에 따른 비교는 절점 및 연결선의 수를 증가에 따른 형상모수 및 취약성의 관계를 나타낸 것이다. 네트워크 크기에 따른 형상모수 및 취약성 비교는 척도없는 네트워크, 무작위 네트워크, 형상모수가 크기가 1.5, 2.2, 3.5인 네트워크를 대상으로 하였다.

무작위 네트워크와 척도없는 네트워크를 각 각 비율에 따라 결합한 것이다. 결합 비율에 따라, 동일한 절점과 연결선을 가진 다중 연결 시스템은 총 200개이다. 다중 연결 시스템 구성은 프로그램 RTM의 igraph에서 제공하는 함수인 sample_pe, sample_gnm, union을 사용한다.

척도없는 네트워크의 크기에 따른 취약성은 동일한 절점 개수에서 연결선을 늘려가는 조건으로 산출하였다. 척도없는 네트워크는 절점의 개수가 100일 때 형상모수 1.55, 절점의 개수가 200개일 때 형상모수 1.45, 절점의 개수가 400일 때 형상모수 1.48로 나타났다. Fig. 3.14는 척도없는 네트워크에서의 절점 개수에 따른 취약성을 나타낸 것으로서, 가로축은 연결선 정도이며, 세로축은 취약성이다. 가로축의 크기가 3보다 13인 경우, 절점의 연결선 독식 정도와 네트워크의 총 연결선의 개수가 증가하는 것을 의미한다. 척도없는 네트워크에서의 취약성 크기의 변화는 절점의 개수 및 형상모수가 바뀌는 경우에 나타났으며, 연결선의 절점 집중 및 개수 증가에 따른 취약성의 변화는 없었다. 척도없는 네트워크에서는 절점의 개수가 늘어남에 따라 취약성 크기는 증가한 반면, 동일한 절점 개수에서 연결선 증가는 취약성에 영향을 주지 않았다.

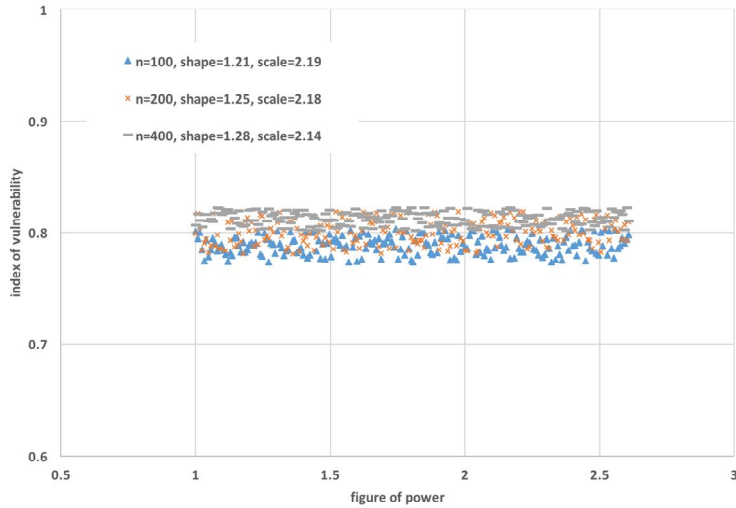


Fig. 3.14 Vulnerability of scale-free network according to edge distribution

무작위 네트워크의 크기에 따른 취약성은 절점과 연결선의 개수를 동시에 늘려가는 조건에서 산출하였다. 무작위 네트워크는 절점 개수가 50~250이며, 연결선은 100~1000개이다. 무작위 네트워크에서의 절점 및 연결선 개수를 동시에 증가시킨 것은 절점 증가에 따라 연결선이 증가 되어야 동일한 연결 구조를 유지할 수 있기 때문이다. 취약성을 비교한 무작위 네트워크는 형상모수 크기가 5.78, 5.93, 6.01을 가지며, 형상모수 5.78일 때 연결선의 개수가 100~500, 형상모수 5.93일 때 연결선의 개수가 150~750, 형상모수 6.01일 때 연결선의 개수가 200~1000이다. Fig. 3.15는 무작위 네트워크에서의 절점 개수에 따른 취약성을 나타낸 것으로서, 가로축은 절점의 개수, 세로축은 취약성을 의미한다. 그 결과, 무작위 네트워크에서의 취약성은 절점 및 연결선 개수가 증가함에 따라 커졌으며, 형상모수의 크기 변화에는 영향을 받지 않았다.

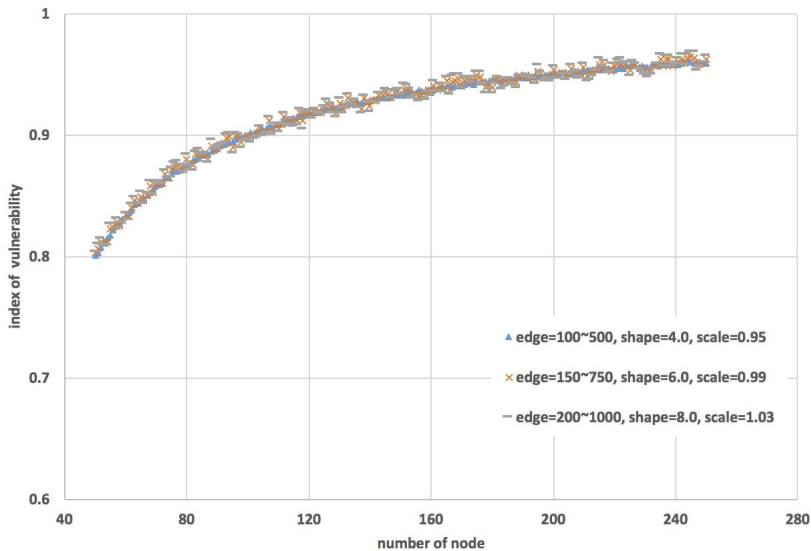


Fig. 3.15 Vulnerability of random network according edge distribution

무작위 및 척도없는 네트워크를 혼합한 네트워크의 취약성은 동일한 연결 구조에서 절점 개수를 늘려가는 조건에서 산출하였으며, 혼합한 네트워크의 종류는 총 3가지로서, 각각의 형상모수는 1.5, 2.2, 3.0이다. Fig. 3.16은 다중 연결 시스템의 절점 개수에 따른 취약성 크기를 나타낸 것이며, 가로축은 절점의 개수, 세로축은 취약성이다. 혼합 네트워크에서의 취약성은 형상모수가 커지는 경우와 절점의 개수가 증가하는 경우에 커지는 것으로 나타났다. 형상모수의 크기가 1.5인 혼합 네트워크에서의 취약성은 절점의 개수가 150에서 750으로 늘어남에 따라 0.993에서 0.993로 증가하였다. 그러나 형상모수가 1.5에서 3.0으로 커짐에 따라 취약성은 절점 개수 150인 경우 0.993에서 0.990으로 감소하였으며, 다음과 같은 경향은 네트워크의 절점 개수를 나타내는 Fig. 3.16의 가로축에서 나타났다. 혼합 네트워크의 취약성은 규모가 커지는 증가하지만, 형상모수의 크기가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 혼합 네트워크의 취약성은 알려진 바와 같이 네트워크의 규모에 영향을 받고 있을 뿐만 아니라, 연결 구조에 의해서도 영향을 받았다. 따라서 동일한 규모의 혼합 네트워크에서 연결 구조에 따른 취약성을 산출하고 형상모수와 취약성을 비교하였다.

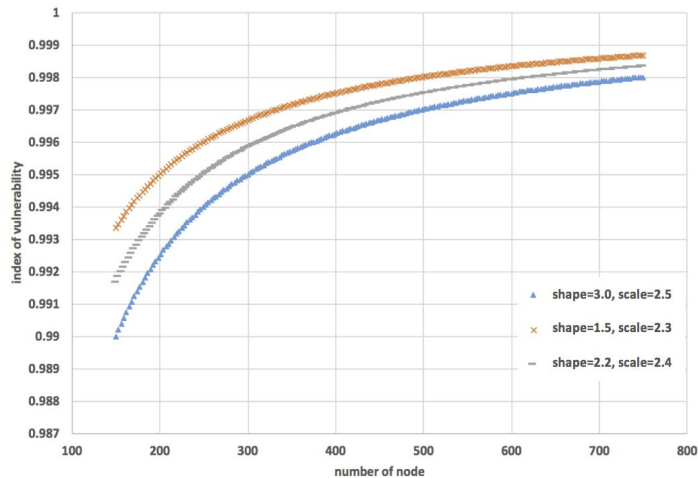
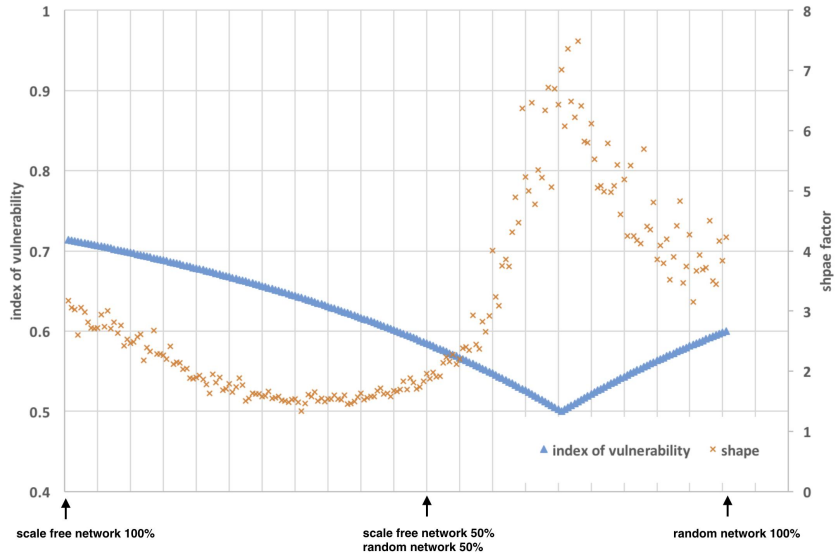


Fig. 3.16 Vulnerability of real network according to edge distribution

동일한 규모의 혼합 네트워크에서 형상모수 및 취약성은 연결 구조를 변화시킴에 따라 분석하였다. 형상모수와 취약성을 분석한 혼합 네트워크는 총 2가지이며, 절점의 개수가 100, 연결선의 개수가 400인 네트워크와 절점의 개수가 400, 연결선의 개수가 1000인 네트워크이다. Fig. 3.17은 혼합 네트워크의 연결 구조 변화에 따른 형상모수와 취약성 크기를 나타낸 것이며, Fig. 3.17(a)은 절점의 개수가 100인 혼합 네트워크, Fig. 3.17(b)은 절점의 개수가 400인 혼합 네트워크의 결과이다. Fig. 3.17의 가로축은 무작위 네트워크와 척도없는 네트워크의 결합 비율을 나타내는 것이며, 가로축이 0인 경우 척도없는 네트워크가 100% 비율로 구성된 혼합 네트워크, 가로축이 200인 경우 무작위 네트워크가 100%로 구성된 혼합 네트워크를 의미한다. Fig. 3.17의 세로축은 형상모수와 취약성 크기를 나타낸 것이다. 절점의 개수가 100인 혼합 네트워크의 취약성은 0.995에서 0.997로 나타났으며, 가로축 크기 150에서 가장 작은 값인 0.995로 분석되었다. 절점의 개수가 100인 혼합 네트워크의 형상모수는 1.500에서 7.300의 값으로 나타났으며, 가로축의 크기가 150 부근에서 가장 큰 값이 7.300으로 분석되었다. 다음과 같은 경향은 절점의 개수가 400인 혼합 네트워크에서도 나타났다. 즉, 동일한 규모인 혼합네트워크의 형상모수와 취약성은 연결 구조가 변함에 따라 감소와 증가를 반복하였으며, 형상모수의 크기가 가장 큰 경우와 취약성의 크기가 가장 작은 경우는 다중 연결 시스템의 유사한 연결 구조에서 나타났다. 앞서 도출한 무작위 네트워크 및 척도없는 네트워크의 혼합한 구조의 형상 모수와 취약성의 관계는 형상 모수를 독립변수와 취약성을 종속변수로 도식함에 따라 Fig. 3.18과 같이 나타났다. Fig. 3.18에서 혼합한 구조의 네트워크 취약성은 형상 모수가 증가함에 따라 감소하는 추세를 보였다.

(a) small size network



(b) medium size network

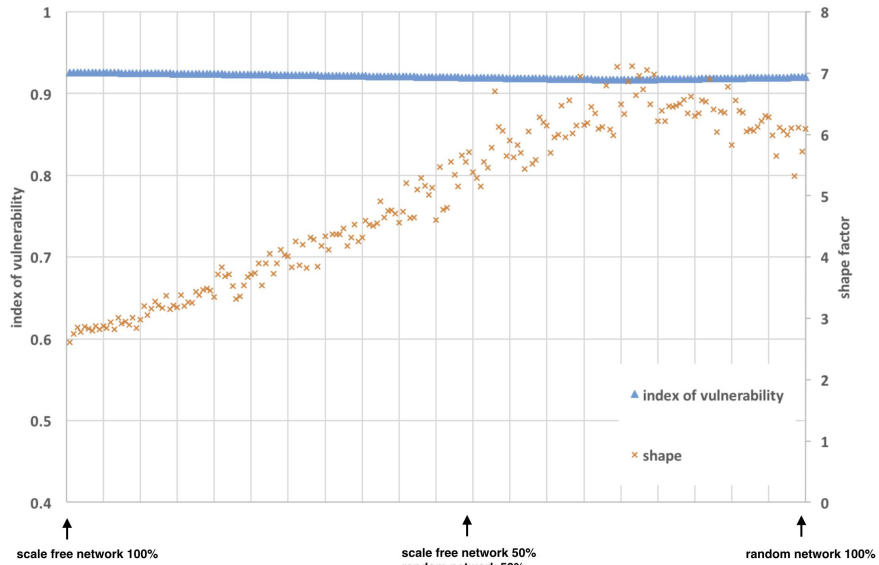
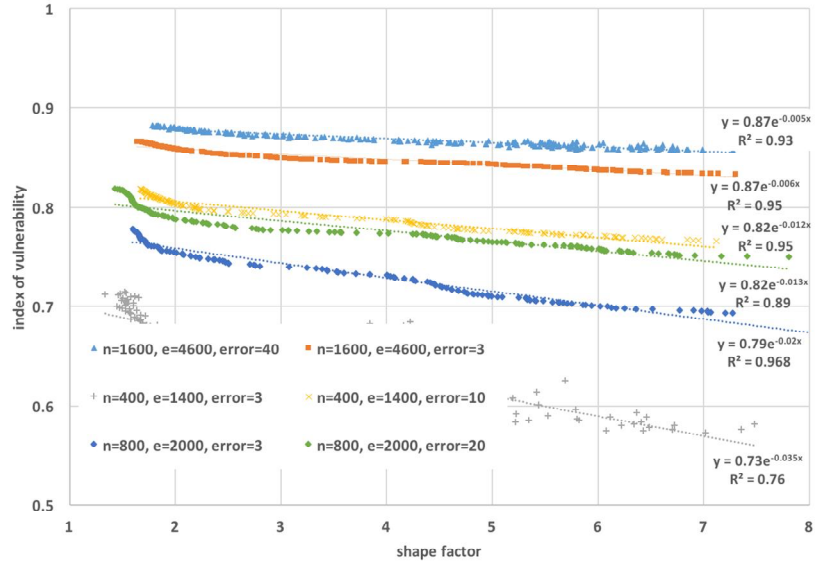


Fig. 3.17 change of shape factor and vulnerability according to edge distribution

(a) small size network



(b) medium size network

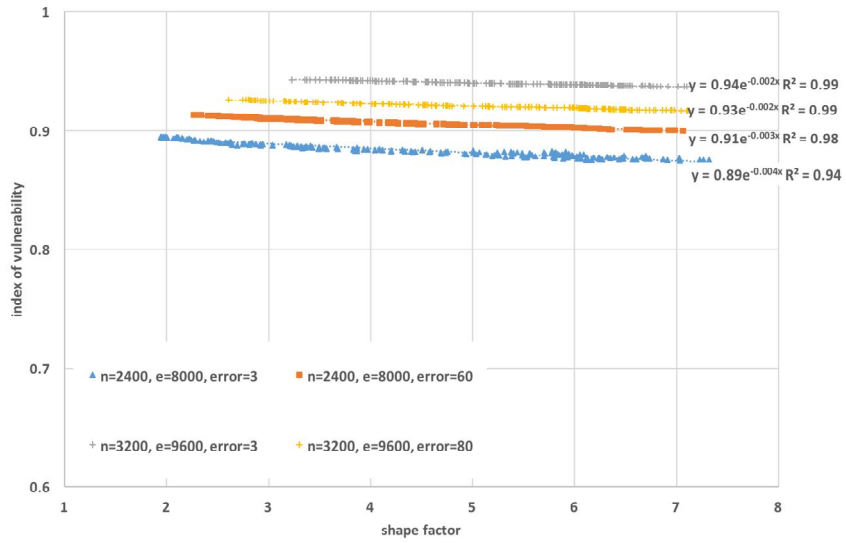


Fig. 3.18 Relationship between shape factor and network vulnerability

제4장 다중 연결 시스템의 취약성 모델 개발

4.1 모델의 개발

4.1.1 모델의 해석 범위

지역 사회의 발전은 시스템을 구성하고 있는 개별 요소의 관계를 형성함에 따라, 지역 사회는 복수의 객체가 연결되어 활동을 하는 다중 연결 시스템의 구조가 되었다. 다중 연결에서의 문제는 시스템을 구성하고 있는 각각의 개별 요소 문제보다 요소들의 관계에서 발생하고 있는 문제가 많으며, 구성 요소 사이의 연결이 증가함에 따라 문제의 복잡도 또한 높아지고 있다. 따라서 본 연구에서는 지역 사회에서 발생하는 문제를 해결하기 위해 다중 연결을 고려하여 취약성을 분석할 수 있는 모델을 개발하고자 한다.

지역 사회에서 발생하고 있는 다중 연결 시스템은 직접 및 간접 연결, 구성 요소 관계의 방향성 유무, 시스템 구성 요소의 균일성을 기준으로 범주를 분류할 수 있다. 또한 다중 연결 시스템을 구성하고 있는 요소들의 연결은 물리적 거리의 고려 여부에 따라 속성을 구분할 수 있다. 본 연구에서는 간접 연결, 방향성이 없는 관계, 균일한 구성 요소로 이루어진 다중 연결 시스템을 대상으로 취약성을 분석하고자 한다. 다중 연결 시스템의 취약성 분석은 네트워크 분석 기법을 기반으로 하고 있어, 다중 연결 시스템의 네트워크 모사가 필요하다. 다중 연결 시스템의 간접 연결, 방향성이 없는 관계, 균일한 구성 요소는 네트워크에서 가중치를 가지는 연결선, 방향이 없는 연결선, 동일한 속성으로 구성된 절점으로 모사된다.

4.1.2 네트워크 구조 확률 함수 기반 취약성 모델 개발

다중 연결 시스템의 취약성 분석은 시스템의 구성 요소의 관계에 따른 취약성을 분석하기 위해서 네트워크의 연결 구조에 따른 형상모수와 취약성 관계를 활용하였다. 앞서 도출한 네트워크의 형상모수와 취약성의 관계는 형상모수를 독립변수와 취약성을 종속변수로 도식함에 따라, 네트워크의 취약성은 형상 모수가 증가한 경우에 감소하였으며, 형상모수에 따른 취약성의 변화를 커브피팅(curve fitting) 실시한 결과, 취약성 곡선은 지수함수의 형태를 나타냈다. 따라서 다중 연결 시스템의 취약성 분석 모델은 네트워크의 형상모수와 취약성의 관계를 활용하여 식 4.1과 같이 개발하였다.

$$vulnerability = a \cdot e^{-bx} \quad (4.1)$$

where, a and b : constant

4.2 모델의 검증

개발한 모델은 농산물 무역에 의한 다중 연결 시스템의 취약성 분석으로 검증한다. 개발한 모델의 검증에 사용된 농산물 무역 자료는 FAOTM(Food and Agricultural Organization of the United nations)에서 제공하고 있는 2003년부터 2013년의 국가별 사과, 배, 버섯의 교역량 자료를 사용한다 (Table 4.1).

유엔 소속의 식량 농업 기구인 FAOTM는 전 세계의 농업에서 사용하고 있는 물 자료, 농산물 무역 자료, 무역에 따른 물 이동 경로의 자료 등을 제공하고 있다. 검증에 사용된 농산물 무역 자료는 2003년부터 2013년까지 국가별 사과, 버섯, 배 교역량을 나타낸 것이다. 국가별 사과, 버섯, 배의 교역량 자료는 국가 및 관련 코드, 품목 및 관련 코드, 수출액 등으로 구성되어 있다(Table 4.2). 농산물 무역 네트워크를 구성에는 절점으로 수출입 국가와 연결선으로 수출액을 사용한다.

Table 4.1 Subject of study for verification

agricultural product trade	
data	FAO (apple, mushroom, pear) (from 2003 to 2013)
type	real network
node	country
edge	whole export volume

네트워크의 특징은 절점과 연결선의 속성으로 구분되고 있어, 개발한 모델의 적용 범위는 절점과 연결선의 종류로 구분한다(Table 4.1). 절점의 속성은 동일한 네트워크에서 균질한(homogeneous) 요소로 한정한다. 농산물 무역을 모사한 네트워크의 절점은 국가가 된다. 연결선의 속성은 절점간 상호작용 유무, 상호작용 크기, 상호작용 방향으로 구분된다. 검증에 사용된 자료의 연결선은 절점간 상호작용의 유무 및 크기로 한정하며, 연결선의 상호작용의 방향은 고려하지 않는다. 농산물 무역을 모사한 네트워크 경우, 연결선은 두 국가간 수출입 유무 및 수출액만을 고려한다.

개발한 모델은 농산물 무역 국가의 변동에 따른 형상모수에 의한 취약성과 반복 계산에 의한 취약성 차이를 이용하여 검증하였다. 적용 대상은 농산물 무역 네트워크이며, 국가를 절점, 교역량을 연결선으로 구성된 다중 연결 시스템을 모사한 것이다. 농산물 무역 네트워크의 취약성 평가는 절점 제거를 이용한 반복 계산 방법과 지수함수를 이용한 방법으로 이루어졌다. 그리고 개발한 모델의 취약성 평가는 반복 계산으로 도출한 취약성과 지수함수로 도출한 취약성을 비교함으로써 실제 문제에 적용 가능한지를 분석하였다. 농산물 무역 네트워크의 취약 지점은 PCBF에 의한 군집 연결 절점과 MCS에 의한 군집 연결 절점으로 나타났다. 개발한 모델에 의한 취약 지점은 PCBF 및 MCS에 의한 연쇄적 반응 경로를 비교함으로써 실제 문제에 적용 가능성 여부를 분석하였다.

Table 4.2 Feature of agricultural product trade data provided by FAO

Domain Code	Domain	Reporter Country Code	Reporter Countries	Partner Country Code	Partner Countries	Element Code	Element	Item Code	Item	Year Code	Year	Unit	Value
TM	Detailed trade matrix	4	Algeria	68	France	5922	Export Value	515	Apples	2003	2003	1000 US\$	1
TM	Detailed trade matrix	9	Argentina	4	Algeria	5922	Export Value	515	Apples	2003	2003	1000 US\$	8
TM	Detailed trade matrix	9	Argentina	13	Bahrain	5922	Export Value	515	Apples	2003	2003	1000 US\$	85
TM	Detailed trade matrix	9	Argentina	255	Belgium	5922	Export Value	515	Apples	2003	2003	1000 US\$	13160
TM	Detailed trade matrix	9	Argentina	19	Bolivia (Plurinational State of)	5922	Export Value	515	Apples	2003	2003	1000 US\$	326
TM	Detailed trade matrix	9	Argentina	21	Brazil	5922	Export Value	515	Apples	2003	2003	1000 US\$	10983
TM	Detailed trade matrix	9	Argentina	96	China, Hong Kong SAR	5922	Export Value	515	Apples	2003	2003	1000 US\$	67

농산물 무역 네트워크는 수출입 국가 및 교역량 활용하여 모사하였으며, Fig. 4.1은 2013년 사과 무역을 모사한 다중 연결 시스템, Fig. 4.2는 2013년 버섯의 무역을 모사한 다중 연결 시스템, Fig. 4.3은 2013년 배의 무역을 모사한 다중 연결 시스템이다. 농산물 무역 네트워크는 연도별 1개를 구성하였으며, 농산물 무역 네트워크는 총 33개, 품목별 무역 네트워크는 11개씩이다. 농산물 무역 네트워크의 절점은 171~207개이며, 연결선은 979~1737개이다. 농산물 무역 네트워크에서의 중심성이 높은 절점은 남아공, 네덜란드, 미국, 중국 등이 있으며, 한국은 상위 20~30위 권이었다. 사과 무역의 주요 지점은 프랑스, 미국, 남아공, 버섯 무역의 주요 지점은 중국, 프랑스, 네덜란드, 배 무역의 주요 지점은 남아공, 네덜란드, 중국이다 (Table 4.3). 주요 지점은 농산물 무역 네트워크에서 중심성이 높은 절점을 의미한다.

Table 4.3 Feature of agricultural product export data in 2003~2013(FAO)

	apple			mushroom			pear		
	nodes	edges	major region	nodes	edges	major region	nodes	edges	major region
2003	201	1450	France, S o u t h Africa, USA	198	1187	C h i n a , Netherlands, France	190	979	Netherlands, South Africa, China
2004	201	1522	USA, South Africa, Netherlands	191	1239	C h i n a , Netherlands, France	184	1042	Netherlands, South Africa, USA
2005	201	1521	France, U S A , Netherlands	191	1220	C h i n a , Netherlands, Italy	188	1098	Netherlands, South Africa, China
2006	199	1477	France, Netherlands, China	192	1123	C h i n a , Netherlands, Italy	187	1095	Netherlands, South Africa, China
2007	203	1577	S o u t h A f r i c a , USA, China	192	1199	C h i n a , France, Italy	194	1104	South Africa, Netherlands, China
2008	206	1577	China, South Africa, USA	1195	1224	C h i n a , France, Italy	193	1159	South Africa, C h i n a , Netherlands
2009	207	1578	F r a n c e , USA, South Africa	195	1274	China, Italy, Germany	193	1146	South Africa, Netherlands, China
2010	207	1613	F r a n c e , USA, South Africa	199	1278	C h i n a , France, Italy	195	1149	South Africa, Netherlands, China
2011	201	1614	F r a n c e , USA, Italy	199	1321	C h i n a , France, Italy	193	1161	South Africa, Netherlands, China
2012	204	1694	F r a n c e , USA, South Africa	198	1407	C h i n a , France, Italy	171	1213	South Africa, Netherlands, Spain
2013	207	1737	F r a n c e , USA, South Africa	199	1430	C h i n a , France, Italy	198	1226	South Africa, Spain, USA

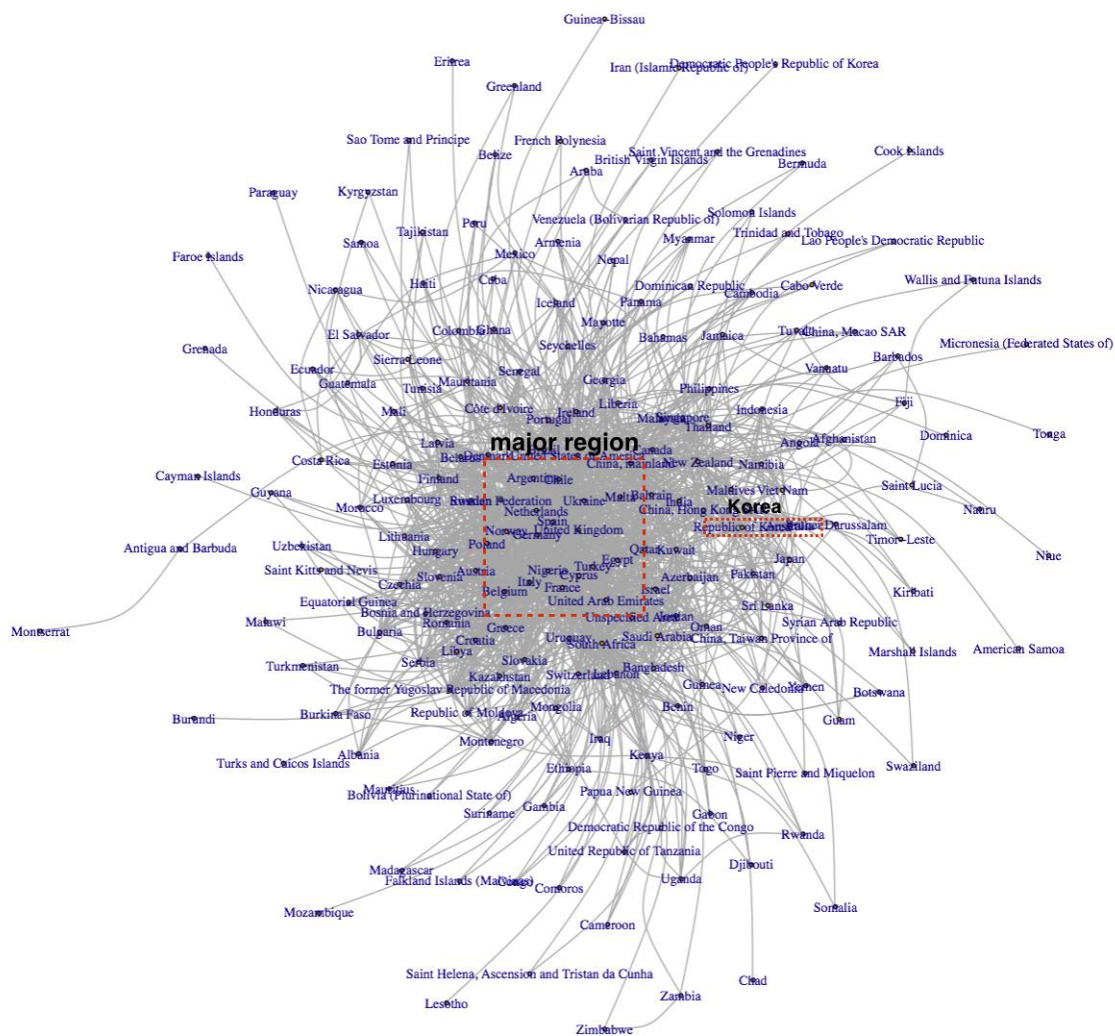


Fig. 4.1 Apple trade network in 2013

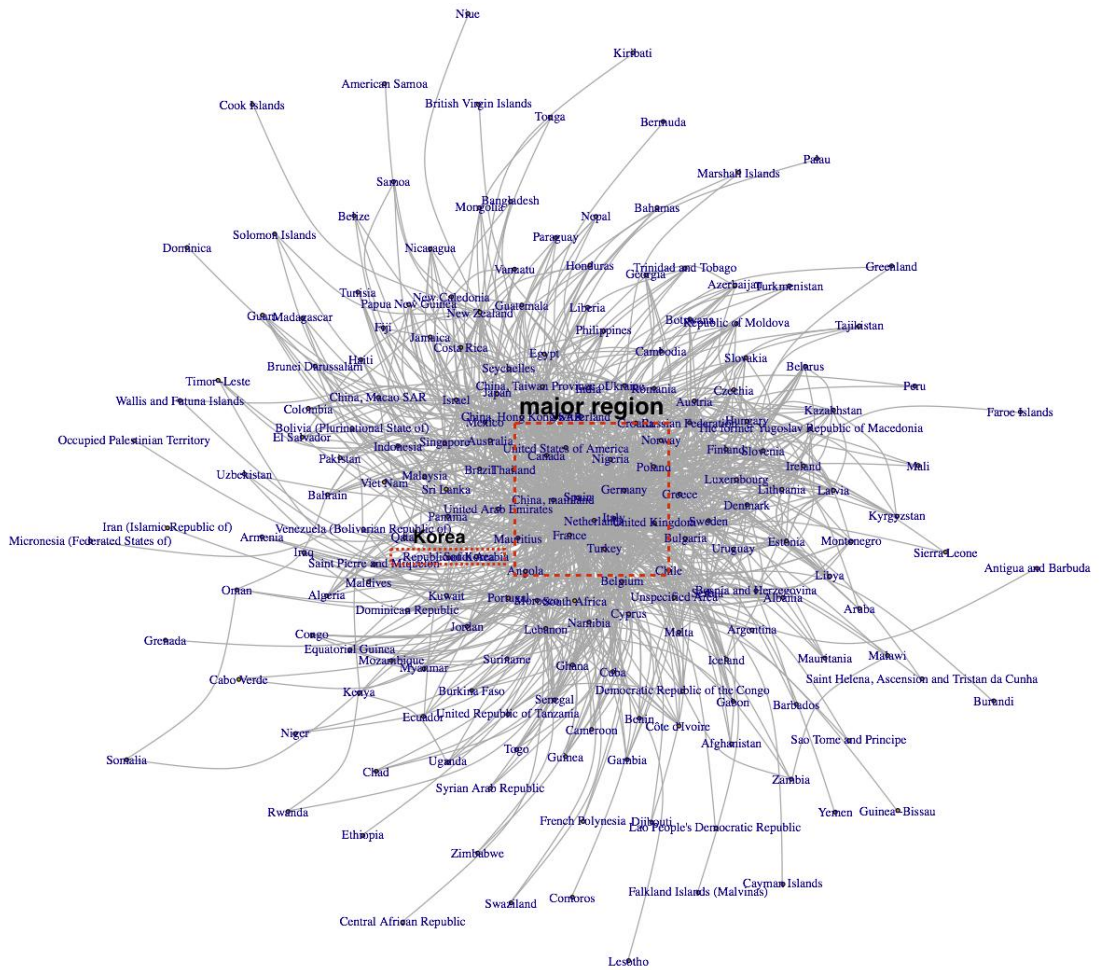


Fig. 4.2 Mushroom trade network in 2013

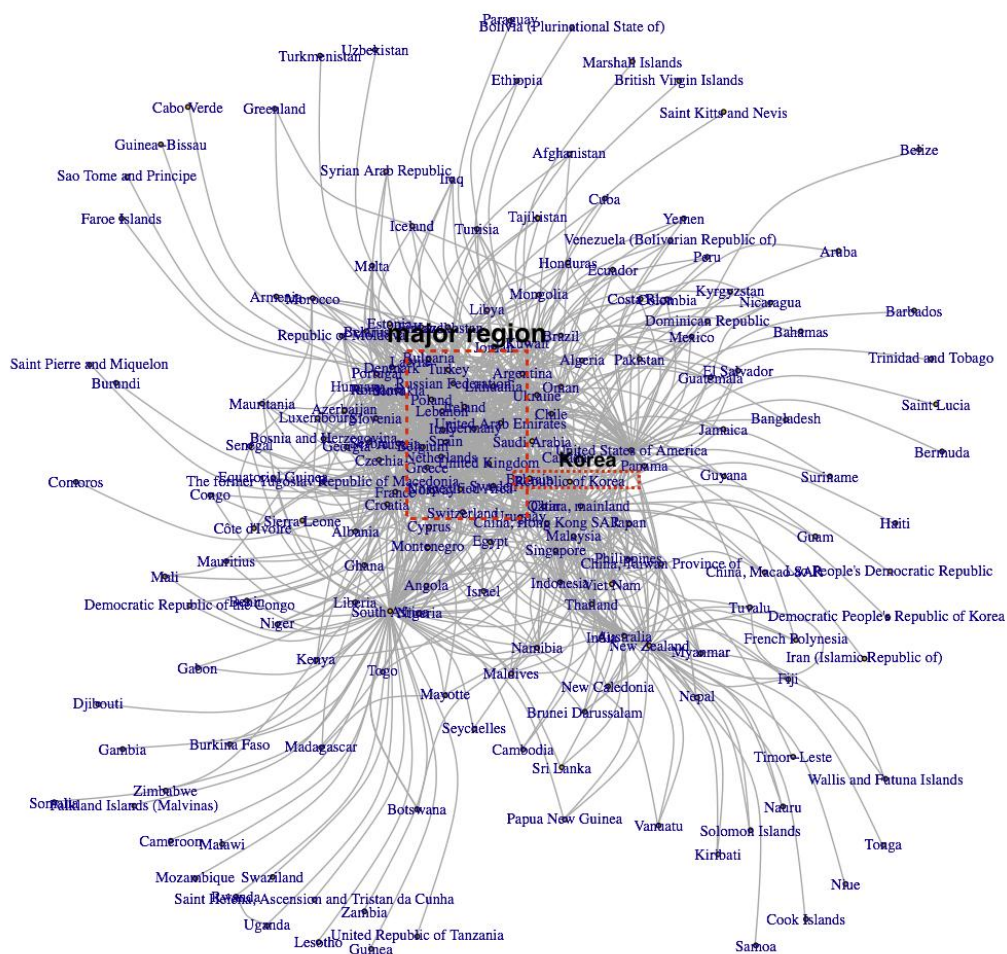


Fig. 4.3 Pear trade network in 2013

지수함수에 의한 농산물 무역 네트워크의 취약성은 지수함수의 상수를 도출하고, 함수의 독립변수로 형상모수를 적용함으로써 평가하였다. 지수함수의 상수는 동일한 품목의 농산물 무역 네트워크에서 연결 구조에 의한 형상모수 및 반복 계산에 의한 취약성을 적용하여 산출하며, 사용하는 무역 네트워크는 품목별 2개씩이다. 농산물 무역 네트워크는 사과, 버섯, 배 품목별 절점과 연결선의 개수가 같지 않기 때문에 동일한 지수함수를 사용하여 전체 농산물 무역 네트워크의 취약성을 평가할 경우 정확도가 떨어질 수 있어 품목별 구분하여 지수함수의 상수를 도출하였다. 그 결과, 사과 무역 네트워크에서 지수함수의 상수는 $a=1.004$, $b=0.003$ 으로 산출되었다.

사과, 버섯, 배의 취약성 평가 지수함수는 앞서 언급한 방법으로 구성하였으며, 반복 계산으로 도출한 취약성과 지수함수로 산출한 취약성을 비교하였다(Table 4.4, Table 4.5, Table 4.6). 사과 무역 네트워크를 대상으로 분석한 취약성의 차이는 0.07% 이다. 버섯 무역 네트워크를 대상으로 분석한 취약성의 차이는 0.04% 이다. 배의 무역 네트워크를 대상으로 분석한 취약성의 차이는 0.06% 로 나타났다. 형상모수를 독립 변수로 하는 지수함수에 의한 취약성은 사과, 버섯, 배를 대상으로 평가하였으며, 반복 계산과의 오차율은 0.04%~0.07%로 나타났다. 또한 지수함수에 의한 취약성은 농산물 무역 네트워크의 규모가 차이가 발생함에도 불구하고 반복 계산에 의한 취약성 크기와 차이가 미비하였다. 따라서 개발한 모델의 취약성 평가는 실제 문제에 적용이 적합하였다.

Table 4.4 Apple trade network vulnerability using shape factor and recursive calculation

year	vulnerability	shape factor	vulnerability by function	total number of node	total number of edge
2003	0.502	2.756	0.486	201	1450
2004	0.502	2.756	0.486	201	1522
2005	0.502	2.756	0.486	201	1521
2006	0.497	2.721	0.497	199	1477
2007	0.507	2.752	0.487	203	1577
2008	0.514	2.718	0.498	206	1577
2009	0.516	2.723	0.496	207	1578
2010	0.516	2.754	0.486	207	1613
2011	0.502	2.782	0.478	201	1614
2012	0.509	2.761	0.485	204	1694
2013	0.516	2.713	0.499	207	1737

Table 4.5 Mushroom trade network vulnerability using shape factor and recursive calculation

year	vulnerability	shape factor	vulnerability by function	total number of node	total number of edge
2003	0.494	2.843	0.497	198	1187
2004	0.476	2.854	0.497	191	1239
2005	0.476	2.869	0.497	191	1220
2006	0.479	2.801	0.496	192	1123
2007	0.479	2.863	0.497	192	1199
2008	0.487	2.917	0.497	195	1224
2009	0.487	2.896	0.497	195	1274
2010	0.497	2.864	0.497	199	1278
2011	0.497	2.896	0.497	199	1321
2012	0.494	2.912	0.497	198	1407
2013	0.497	2.911	0.497	199	1430

Table 4.6 Pear trade network vulnerability using shape factor and recursive calculation

year	vulnerability	shape factor	vulnerability by function	total number of node	total number of edge
2003	0.502	2.756	0.486	201	1450
2004	0.502	2.756	0.486	201	1522
2005	0.502	2.756	0.486	201	1521
2006	0.497	2.721	0.497	199	1477
2007	0.507	2.752	0.487	203	1577
2008	0.514	2.718	0.498	206	1577
2009	0.516	2.723	0.496	207	1578
2010	0.516	2.754	0.486	207	1613
2011	0.502	2.782	0.478	201	1614
2012	0.509	2.761	0.485	204	1694
2013	0.516	2.713	0.499	207	1737

PCBF에 의한 취약 지점의 실제 문제에 사용 가능성은 농산물 무역 네트워크의 핵심 지역에 연쇄적 반응을 발생시키고, 계층도(dendrogram)에서 연쇄적 반응의 주요 절점, MCS에 의한 연쇄적 반응의 정도가 큰 절점, PCBF에 의한 연쇄적 반응의 정도가 큰 절점을 비교함으로써 도출하였다. 연쇄적 반응의 정도가 큰 절점의 분석 대상은 2003년 사과, 2004년 버섯, 2010년 배로 구성된 무역 네트워크이다. 핵심 지역은 중심성이 높은 절점으로 구성된 농산물 무역 네트워크의 군집이며, 핵심 지역 이외 군집과 연결이 상대적으로 많이 구성되어 있기 때문에 연쇄적 반응의 정도가 큰 절점의 분석이 용이하다(Mucha et al., 2010).

사과 무역 네트워크의 핵심 지역은 이탈리아 및 프랑스를 포함하고 있는 Fig. 4.4(a)이다. 연쇄적 반응의 발생 절점은 독일로 지정하였으며, 계층도의(Fig. 4.4(b)) 연쇄적 반응의 정도가 큰 절점은 덴마크와 모로코로 나타났다. PCBF 및 MCS에 의한 사과 무역 네트워크의 연쇄적 반응의 정도가 큰 절점은 덴마크와 모로코가 가능성이 높은 것으로 분석되었다(Table 4.7). 스페인은 PCBF 및 MCS 분석으로부터 연쇄적 반응 경로의 가능성이 높은 것으로 나타났지만, 연쇄적 반응이 발생한 독일에 직접 연결된 절점이기 때문에 군집 연결 절점의 대상에서 제외하였다. 사과 무역 네트워크에서 PCBF와 MCS의 오차율은 7.011% 이다.

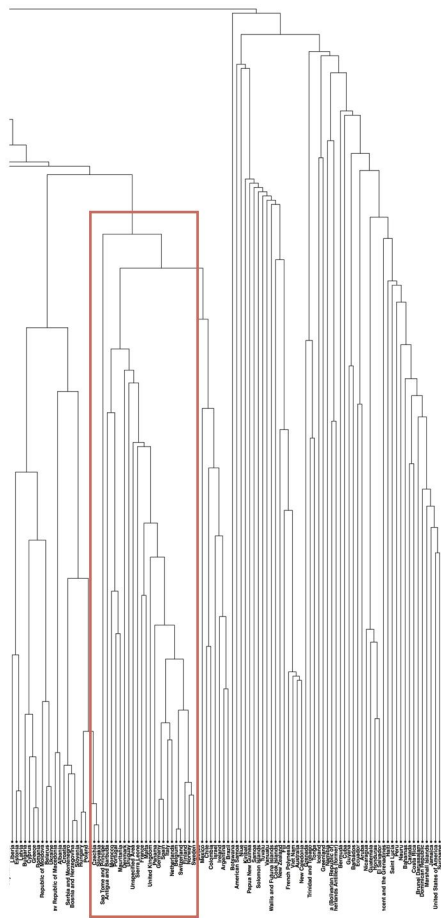
버섯 무역 네트워크의 핵심 지역은 이탈리아, 스페인, 프랑스를 포함하고 있는 Fig. 4.5(a)이다. 연쇄적 현상 발생 지점은 이탈리아로 지정하였으며, 계층도의(Fig. 4.5) 연쇄적 반응의 정도가 큰 절점은 쿠바 및 부르키나파소로 나타났다. PCBF와 MCS에 의한 연쇄적 반응의 정도가 큰 절점은 쿠바 및 스페인이 가능성이 높은 것으로 분석되었다(Table 4.7). 스페인은 연쇄적 반응 경로의 절점으로 가능성이 높은 것으로 나타났지만, 연쇄적 반응이 발생한 이탈리아에 직접 연결 절점으로 대상에서 제외하였다. PCBF와 MCS의 오차율은 5.590% 이다.

배 무역 네트워크의 핵심 지역은 벨기에와 독일을 포함하고 있는 Fig. 4.6(a)이다. 연쇄적 반응 발생 지점은 독일 절점으로 지정하였으며, 계층도의(Fig. 4.6(b)) 연쇄적 반응의 주요 절점은 이스라엘로 나타났다. PCBF와 MCS에 의한 연쇄적 반응의 정도가 큰 절점은 이스라엘과 잠비아로 가능성이 높은 것으로 분석되었다(Table 4.7). 벨기에는 PCBF 분석 결과 59.74%로 연쇄적 반응의 정도가 큰 절점으로 가능성이 높은 것으로 나타났지만 연쇄적 반응이 발생한 독일에 직접 연결 절점으로 대상에서 제외하였다. PCBF와 MCS의 오차율은 8.547% 으로 가장 높았다.

Table 4.7 Community bridge between PCBF and MCS about apple trade major region in 2003

country	PCBF	MCS	modularity	probability distribution	
				mean	Std.
Sweden	34.323	34.324	0.089	3.000	1.940
Norway	31.234	31.232	0.167	3.000	1.720
Finland	32.914	32.913	0.202	3.000	1.730
Switzerland	35.846	35.845	0.752	2.000	1.500
Netherlands	38.026	38.028	0.813	2.000	1.460
Italy	37.788	37.791	0.814	2.000	1.300
Spain	56.748	56.753	0.746	1.000	1.470
Panama	34.455	34.452	0.778	2.000	1.670
UK	22.381	22.378	0.603	2.000	1.390
Malta	29.475	29.470	0.889	2.000	1.560
France	28.384	28.381	0.765	3.000	1.880
Sierra Leone	37.213	37.209	0.646	3.000	1.790
Unspecified	24.953	24.952	0.421	4.000	1.990
Uruguay	29.106	29.106	0.357	4.000	1.940
Denmark	38.906	38.902	0.045	4.000	2.150
Mauritania	34.541	34.540	0.084	5.000	2.080
Portugal	35.962	35.967	0.088	5.000	2.190
Moroco	39.018	39.013	0.073	5.000	2.520
Antigua	28.898	28.901	0.245	5.000	2.440
Sao Tome	35.719	35.714	0.041	5.000	2.220

(a) target area structure



(b) subject of analysis

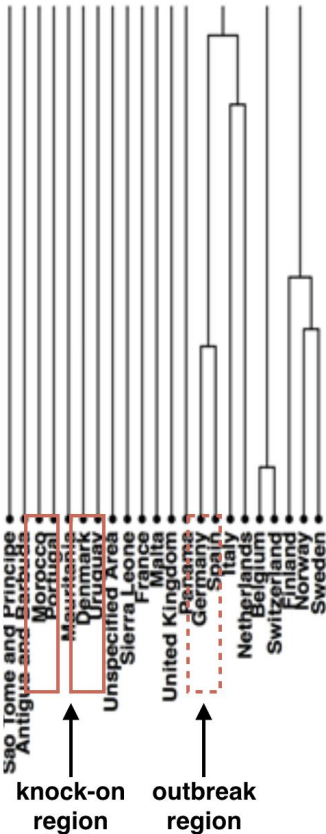


Fig. 4.4 Target selection for conformity assessment using apple trade in 2003

Table 4.8 Community bridge between PCBF and MCS about mushroom trade major region 2004

country	PCBF	MCS	modularity	probability distribution	
				mean	Std.
Kuwait	17.659	17.684	0.017	4.000	2.110
Netherlands	28.564	28.519	0.051	4.000	2.420
France	22.220	22.242	0.102	3.000	1.850
Tunisia	19.622	19.646	0.661	3.000	1.980
Algeria	17.691	17.700	0.678	2.000	2.020
Cote d'Ivoire	21.875	21.829	0.753	3.000	1.820
Gambia	23.681	23.638	0.643	1.000	1.410
Brazil	23.941	23.935	0.784	3.000	1.950
Cameroon	27.491	27.444	0.693	2.000	1.700
Chile	22.216	22.225	0.865	2.000	2.030
Argentina	25.131	25.155	0.778	1.000	1.770
Spain	38.260	38.282	0.653	1.000	2.040
Cuba	31.695	31.735	0.117	1.000	2.280
Paraguay	22.783	22.761	0.299	2.000	2.130
Togo	24.581	24.615	0.058	1.000	2.340
Burkina	29.100	29.080	0.009	3.000	2.460
Syrian Arab	25.026	25.066	0.018	3.000	2.720
Ethiopia	27.661	27.642	0.387	2.000	2.600
Burundi	29.699	29.716	0.021	3.000	2.940
Saint Pierre	24.271	24.228	0.014	3.000	2.780

(a) target area structure

(b) subject of analysis

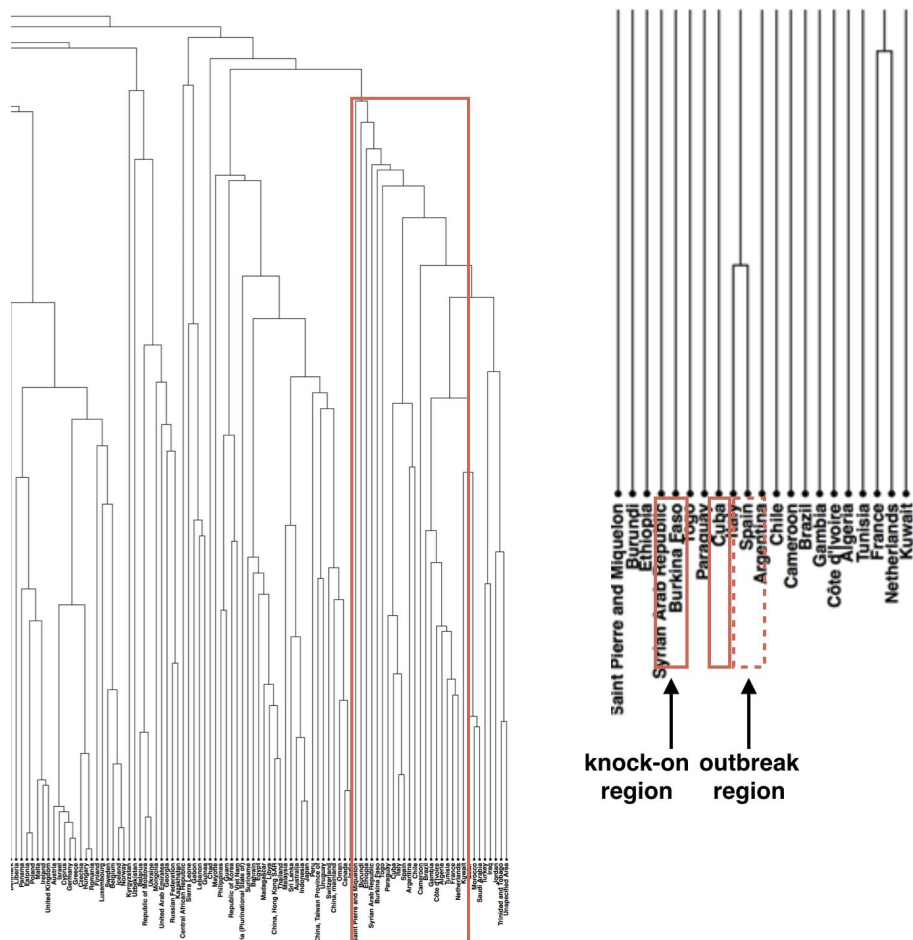


Fig. 4.5 Target selection for conformity assessment using mushroom trade in 2004

Table 4.9 Community bridge between PCBF and MCS about pear trade
major region 2010

country	PCBF	MCS	modularit y	probability distribution	
				mean	Std.
Belgium	56.735	56.735	0.799	1.000	1.640
Lithuania	37.251	37.250	0.689	1.000	1.520
Cyprus	33.355	33.360	0.691	3.000	1.630
Netherlans	35.761	35.763	0.559	2.000	2.020
Israel	41.276	41.278	0.152	3.000	1.940
Switzerlan d	29.018	29.019	0.661	2.000	1.980
France	29.214	29.218	0.769	3.000	1.740
Sweden	28.650	28.656	0.785	4.000	1.940
UK	27.652	27.652	0.658	4.000	1.750
Ireland	22.944	22.944	0.652	3.000	2.080
Gambia	37.818	37.813	0.190	4.000	2.220
Armenia	23.922	23.922	0.149	4.000	2.050

(a) target area structure

(b) subject of analysis

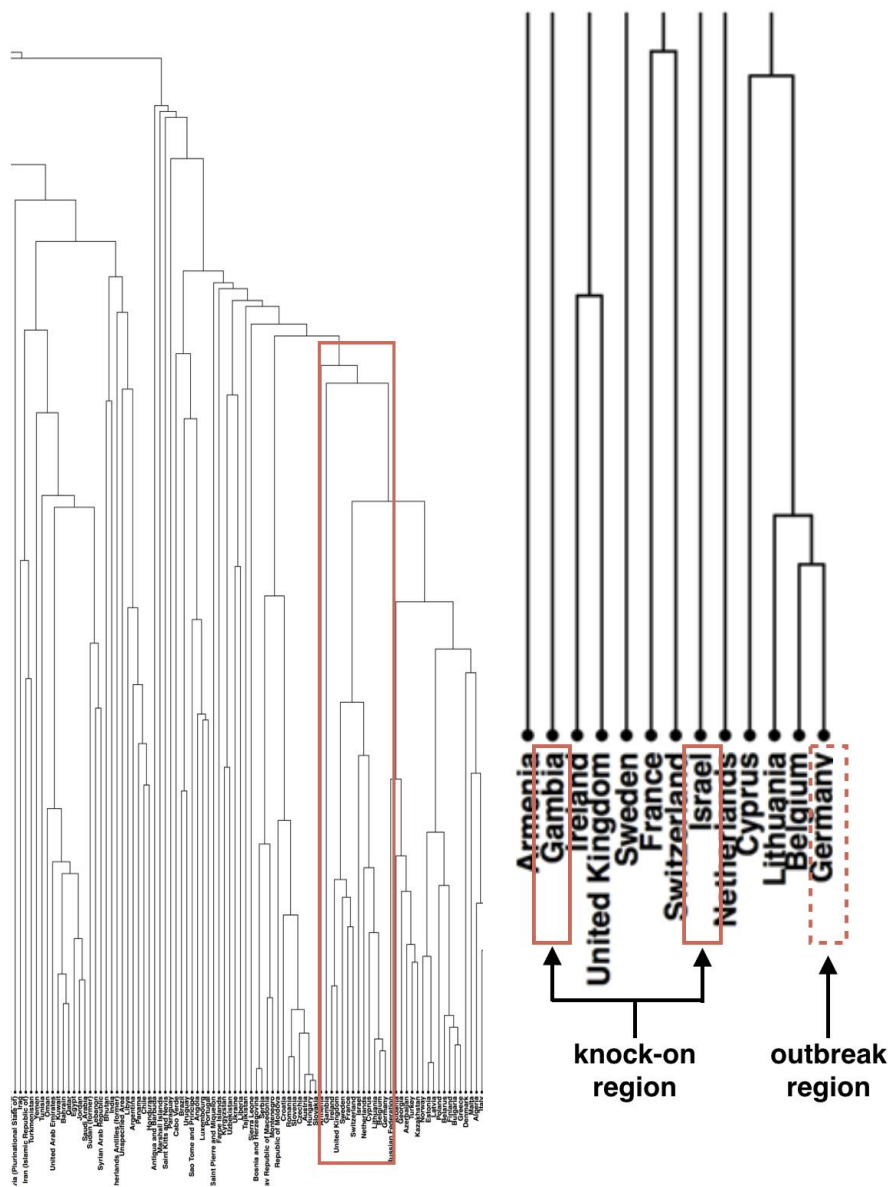


Fig. 4.6 Target selection for conformity assessment using pear trade in 2010

개발한 다중 연결 시스템의 취약성 모델은 농산물 무역의 취약성 평가 및 연쇄적 반응의 지점을 분석함으로써 실제 문제에 적합한지 여부를 판단하였다. 모델은 PCBF에 연쇄적 반응의 정도가 큰 절점 분석과 형상모수 기반 취약성 평가로 구성됨에 따라, 적합성은 2가지 방법으로 평가하였다. 적합성 평가에 사용한 농산물 무역 자료는 2003년부터 2013년까지 버섯, 배, 사과와 수출입 국가 및 교역량이며, 무역 네트워크는 국가를 절점, 교역을 연결선으로 하였다. 연결선의 가중치는 교역량이며, 방향성은 고려하지 않았다.

다중 연결 시스템에서 PCBF에 의한 연쇄적 반응의 정도가 큰 절점과 MCS에 의한 연쇄적 반응의 정도가 큰 절점의 오차율은 7.25%이었다. 사과 무역 네트워크에서 PCBF와 MCS의 오차율은 7.01%, 버섯 무역 네트워크에서 PCBF와 MCS 오차율은 5.59%, 배 무역 네트워크에서 PCBF와 MCS의 오차율은 8.56%였다. 따라서 PCBF는 방향성이 없는 가중치 연결선으로 구성된 다중 연결 시스템의 취약 지점인 연쇄적 반응의 정도가 큰 절점을 분석함에 있어 적합하였다.

동일한 개수의 절점과 연결선으로 구성된 다중 연결 시스템은 연결의 구조에 따라 취약성의 크기가 변하였다. 동일한 규모의 다중 연결 시스템에서 취약성 크기는 형상모수가 커짐에 따라 작아졌으며, 취약성은 형상모수가 약 7인 다중 연결 시스템에서 가장 작았다. 형상모수와 취약성 관계는 다중 연결 시스템에서 무작위 네트워크와 척도없는 네트워크의 결합 비율을 변화로부터 도출한 결과, 취약성의 변화 곡선은 지수 함수로 나타났다. 지수 함수의 상수는 특정 2개년도 농산물 무역 네트워크 대상으로 산출하며, 독립변수를 형상모수로 하고 지수함수에서 종속 변수를 취약성 값으로 하였다. 지수함수에 의한 취약성은 반복 계산으로 산출한 취약성과 비교함으로써 실제 문제에 적용가능성을 분석하였다. 반복 계산과 형상모수를 독립변수로 하는 지수함수에서 취약성 오차율은 0.04%에서 0.07%의 분포를 나타났다.

사과에 의한 무역 네트워크에서 오차율은 0.065%, 버섯의 무역자료에서 오차율은 0.042%, 배의 무역자료에서 오차율은 0.059%였다. 따라서 형상모수를 독립변수로 하는 지수함수는 다중 연결 시스템의 연결 구조로부터 취약성을 도출할 수 있는 것으로 나타났으며, 특정 경우 여러 방법을 동시에 사용해야 가능하였던 취약성 산출을 형상모수 하나만 사용으로 가능하도록 하였다.

제5장 다중 연결 시스템의 취약성 모델 적용

5.1 국내 농산물 수출 품목의 연결 구조 취약성 해석

농산물 수출 안정성 확보는 해외 시장의 확대에 중요한 것으로 알려져 있다(Eun et al., 2016; Kim, 2012; Kim and Han, 2015; Lee, 2010). 농산물 수출은 농산업의 발전과 농가 소득의 확보에 직접적 영향을 미치고 있으며, 정부는 해외 시장의 다각화에 노력중이다(Han and Lee, 2012; Yun, 2012). 무역은 다중 국가들의 관계에 의해 구성되며, 농산물 수출의 안정성은 수출국과 수입국들의 관계에 의해 변한다(Anwarul and Ashoki, 2013; Hayward and Heron, 2002; Hoekman, 2011).

네트워크 분석 기법은 다중 국가를 고려한 농산물 무역의 해석에 유용한 것으로 알려져 있다(Albert and Barabasi, 2002; Dorogovtsev and Mendes, 2003; Raynold, 2004; Shieh and Hu, 2016). 중력모델(Gravity Model)은 세계 무역 유형이나 발전을 설명하는데 유용한 도구로 사용되고 있지만 다중 국가를 동시에 고려하지 수출의 안정성 분석은 한계가 있다(Krempel and Pluemper, 1999). 즉, 무역은 한 국가에서 발생한 경제적 변화를 전 세계에 확산시킬 수 있으며, 글로벌 구조에 의존적인 복잡한 시스템이기 때문에, 국가들의 무역 관계를 글로벌 수준에서 분석하는 것은 많은 시사점을 찾아낼 수 있다(Carrere, 2006; Garlaschelli and Loffredo, 2005; Kali and Reyes, 2010; Im, 2012; Serrano and Boguna, 2003).

국내 농산물 수출은 정부의 환경 개선을 목적인 지원을 실시함에 따라 증가하였다(Kim, 2012). 그러나, 지원을 받는 일부 품목의 수출 편중 현상은 전년대비 농산물 무역의 증가 폭을 하락과 월별 무역량 등락폭을 증가시

켰다(Shin, 2014). 전년 대비 수출 변화량과 월별 수출 변동폭은 농산물 편중에 따른 국내 농산물 수출 환경의 취약성을 평가하는 자료로 사용되고 있어, 수출 품목 및 지역 관계를 고려한 농산물 수출 편중에 따른 취약성의 평가가 미비한 실정이다(Kim et al., 2015). 따라서 수출 품목의 연결 구조를 고려한 취약성 평가를 실시하였다.

5.1.1 국내 농산물 수출 품목 네트워크 구성

품목의 편중에 따른 국내 농산물 수출의 취약성은 본 연구에서 개발한 모델로 평가하였다. 모델의 적용 대상은 국내 농산물 수출 품목이며, 결과는 수출 품목의 연결 구조에 따른 취약성이다. 평가 대상은 국내 농산물 수출 품목으로 구성된 다중 연결 시스템이다. 분석에 사용한 자료는 한국무역통계진흥원(Trade Statistics Service, TRASSTM)에서 제공하고 있는 국내 농산물 수출 통계이다(Table 5.1). 자료는 AGCODE, 품목 명, 연도별 수출량 및 수출액으로 구성되었다. 품목 연결에 의한 다중 연결 시스템 모사에 사용된 자료는 2005년부터 2014년까지 AGCODE 최하위 분류의 품목 및 수출액이다.

분석에 사용한 품목은 신선 농산물 배와 포도 등 48개, 가공식품 후추 등 30개며, 분석에 사용한 국가는 일본, 중국, 미국 등 28개다(Table 5.2). 국내 농산물 수출 품목에 의한 다중 연결 시스템의 절점은 수출 품목이며, 품목간 연결은 동일 국가에 수출 하는 경우에 만들어지는 것으로 하였다(Fig. 5.1). 연결선은 수출 국가를 사이에 두고 두 품목이 수출하는 것으로 구성되며, 연결선의 가중치는 수출액이 작은 품목의 값을 사용하였다. 연결선은 약 220~410의 분포로 나타났다.

국내 수출 품목에 의한 다중 연결 시스템은 연도별 구성하였으며, 또한 절점의 범위에 따라 신선 농산물 및 가공 식품을 포함한 농산물 2가지 구

분하였다. 절점 범위의 기준은 수출 편중이 발생하고 있는 품목을 분석하기 위한 것이며, 가공 식품으로 기준을 설정한 것은 국내 수출 환경은 가공 식품에 의해 개선되고 있기 때문이다.

국내 농산물 수출 품목으로 구성된 다중 연결 시스템의 취약성은 품목간의 연결 구조를 고려한 형상모수로 평가하였으며, 농산물 수출 품목의 편중에 정도에 따른 취약성 변화를 비교하기 위해서 중심성 및 군집 분석을 하였다. 중심성 분석은 국내 농산물 수출이 집중되는 품목을 나타내기 위한 것이며, 군집 분석은 수출 편중이 발생하는 일부 품목을 중심으로 수출권역이 변하는 것을 나타내기 위한 것이다.

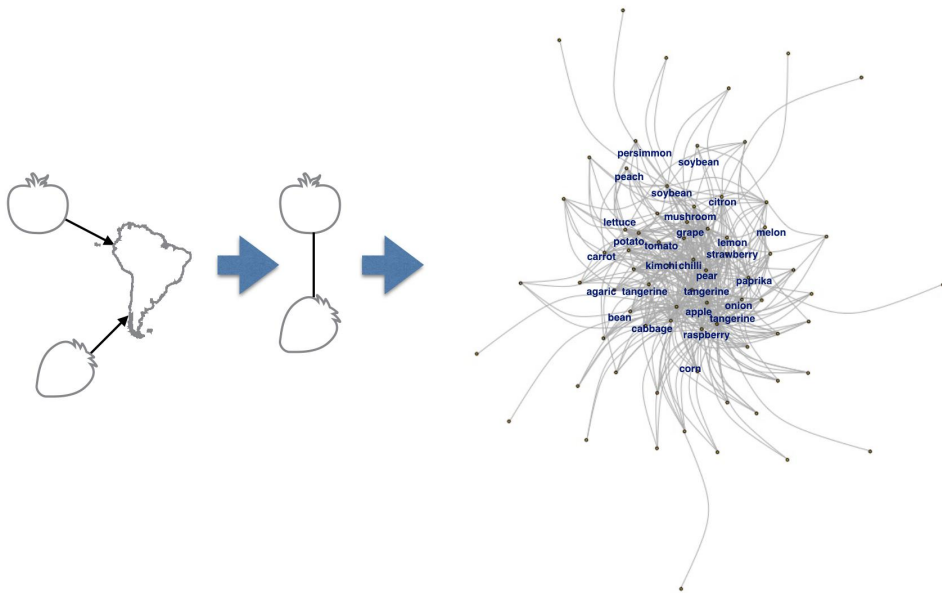


Fig. 5.1 Method of real network configuration by agricultural export item

Table 5.1 Statistical data of domestic agricultural products export items
from TRASStm

AGCODE	aus2005	X2005_kg	X2005_\$	X2006_kg	X2006_\$
0	sum	16,728,958	45,126,483	20,623,911	59,154,322
1	agricultural product	12,195,639	34,762,219	16,049,792	48,999,825
111	grain-sum	55,768	92,894	35,065	82,749
111021003- 1003009020	rye	0	0	300	500
111022008- 1104192000	flake	1,275	2,372	0	0
111023001- 1107100000	malt	12,400	10,688	0	0
111025900- 2101301000	barley	3,194	5,240	1,369	3,330
11102	barley-sum	16,869	18,300	1,669	3,830
111032001- 1101001000	flour	34,689	69,578	22,451	63,778
11103	wheat-sum	34,689	69,578	22,451	63,778
111061003- 1008201010	millet	0	0	375	441
11106	millet-sum	0	0	375	441
111991000- 1008900000	buckwheat etc.	0	0	2,440	5,114
11602	pear-sum	1,210	1,804	0	0
116035100- 2009801010	pear-fresh	3,000	3,212	4,190	5,149
116035901- 2008701000	peach-processed	0	0	3,940	4,437
11603	peach-sum	4,210	5,016	10,570	14,700
116130100- 0810902000	persimmon	8,462	18,641	200	1059

Table 5.2 Using data of items and countries for vulnerability analysis

items	countries
Rice, Lettuce, Button mushroom, Corn, Daikon, Agaric, Potato, Carrot, Enoki mushroom, Sweet potato, orseradish, King oyster mushroom, Soybean, Tomato, Soybean oil, Adzuki bean, Melon, Olive oil, Starch, Strawberry, Grape seed oil, Colza oil, Water melon, Corn oil, Apple, Paprika, Sesame oil, Pear, Onion, Perilla oil, Peach, Welsh onion, Processed citron, Raspberry, Chives, Vegetative wax, Persimmon, Garlic, Saps, Pine apple, Chili, Cakes, Tangerine, Tulip, Doughs, Lemon, Orchid, Soy sauce, Citron, Carnation, Soybean paste, Grape, Gypsophila, Red pepper paste, Seed, etc., Chrysanthemum, Mustard, Chinese cabbage, Cactus, Mayo, Cabbage, Cattleya, Mixed seasoning, Kimchi, Rose, Spice	Bangkok, Brazil, Cambodia, Canada, China, Chile, Hong Kong, India, Iran, Iraq, Laos, Myanmar, Netherlands, Indonesia, New Zealand Norway, Pakistan, Russia, Spain, Srilanka, UAE, UK, Ukraine USA, Uzbekistan, Vietnam, Japan

5.1.2 국내 농산물 수출 품목 네트워크 취약성 분석

수출 품목에 의한 다중 연결 시스템의 중심성은 근접정도, 위세정도, 연결정도 방법으로 분석하였다. 근접정도 및 위세정도를 이용하여 2005년에서 2014년까지 10년 동안 정부에서 수출 지원을 받고 이는 품목의 평균 중심성을 도출하였다. 그리고 연결정도 및 근접 정도는 2005년부터 2014년까지 연도별 측정을 실시하였으며, 그 결과를 이용하여 시기별 중심성이 높은 품목의 수출 편중 정도 변화를 분석하였다.

2005년부터 2014년까지 10년 평균한 근접정도와 위세정도의 값이 높은 품목은 파프리카, 딸기, 팽이버섯, 배 등이다(Table 5.3). 품목별 사이정도는 0.02~0.07으로 대상사이의 편차가 작게 나타났으며, 위세정도는 0.05~0.55으로 사이정도 보다 대상사이의 편차가 크게 나타났다. 사이정도가 높은 품목에는 파프리카, 딸기, 토마토이며, 위세정도가 높은 품목에는 파프리카, 팽이버섯, 배가 나타났다. 파프리카, 딸기, 토마토의 사이정도는 0.07, 0.06, 0.07이며, 파프리카, 팽이버섯, 배의 위세정도는 0.55, 0.35, 0.25로써 높게 나타났다.

Fig. 5.2은 신선 농산물을 절점으로 하는 다중 연결 시스템을 대상으로 연결정도를 분석한 결과이며, 품목의 가지고 있는 연결선 개수를 의미한다. 연결정도의 크기가 30 이상 수출 품목은 고추, 김치, 토마토, 팽이버섯으로 나타났다. 수출 품목의 연결정도는 2009년 및 2010년을 기점으로 증가하였으며, 연결정도의 상승폭이 약 50%이상 수출 품목은 고추, 토마토, 딸기, 팽이버섯으로 나타났다. 2009년 및 2010년은 선도조직 등 신선 농산물 수출 증가를 위해서 정책적 지원을 시작한 시기이다.

Fig. 5.3은 신선 농산물을 절점으로 하는 다중 연결 시스템을 대상으로 근접정도를 분석한 결과이며, 품목간 직접 연결 정도를 의미한다. 파프리카와 김치가 상대적으로 컸으며, 토마토, 고추, 딸기의 근접정도는 0.05~0.08의 분포로 나타났다. 파프리카는 2011년 기점으로 사이정도가 약 20% 상승하였으며, 토마토를 제외한 수출 품종은 하락하거나 유지되는 것으로 나타났다. 토마토의 근접정도는 2005년부터 2008년까지 하락하였으며 2009년 이후 지속적 상승하였다.

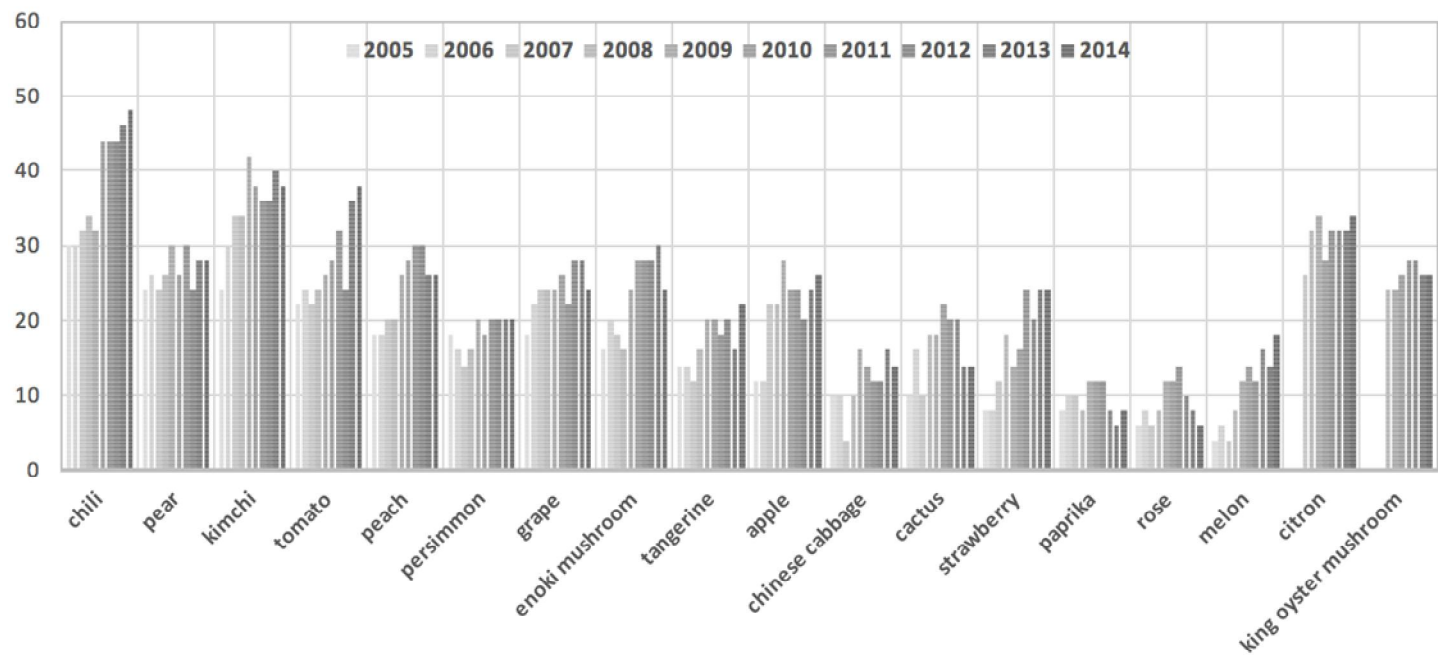


Fig. 5.2 Degree changes of export-led items in 2005~2014

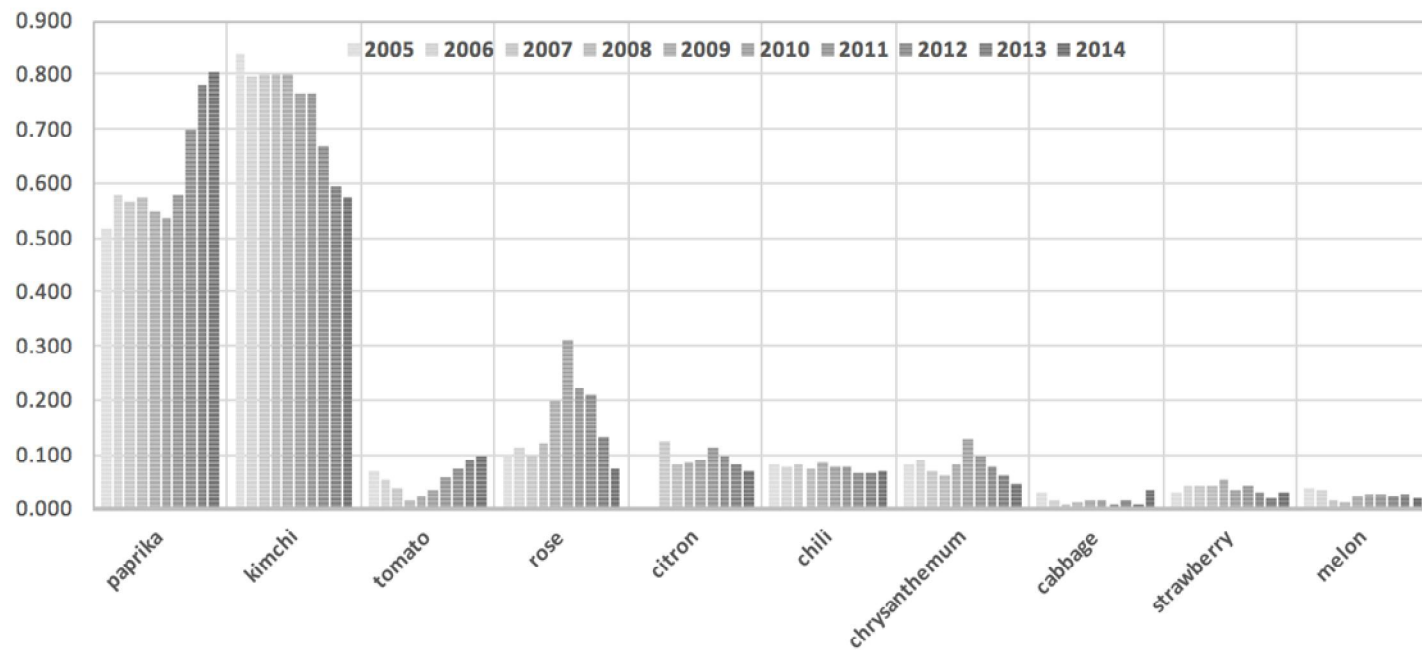


Fig. 5.3 Closeness changes of export-led items in 2005~2014

Table 5.3 Centrality average of policy support items for 10 years

	Closeness		Eigen centrality	
	Agricultural product	Agricultural fresh product	Agricultural product	Agricultural fresh product
pear	0.035	0.039	0.332	0.274
tangerin	0.038	0.039	0.114	0.233
enoki mushroom	0.022	0.038	0.475	0.346
paprika	0.052	0.073	0.521	0.545
tomato	0.037	0.071	0.134	0.189
melon	0.012	0.039	0.033	0.066
apple	0.015	0.022	0.110	0.050
strawberry	0.054	0.063	0.028	0.049

농산물 수출 품목으로 구성된 다중 연결 시스템의 군집 수는 2005년부터 2014년까지 감소하였다(Fig. 5.4). 가공 식품을 포함한 다중 연결 시스템의 군집 수는 9개에서 5개로 줄었으며, 신선 농산물에 의한 다중 연결 시스템의 군집 수는 14개에서 5개로 감소하였다. 가공 식품을 포함한 다중 연결 시스템 보다 신선 농산물로 구성된 다중 연결 시스템의 군집 수는 감소폭이 크게 나타났다.

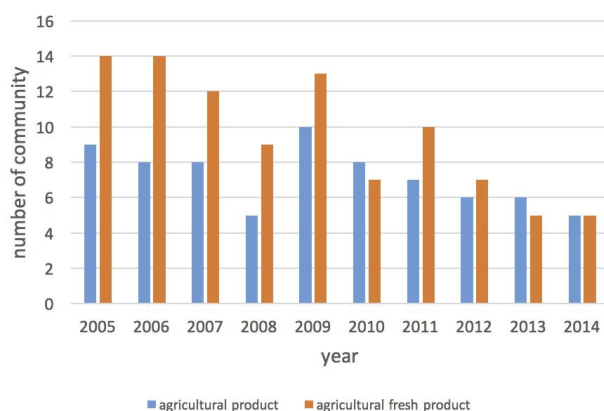
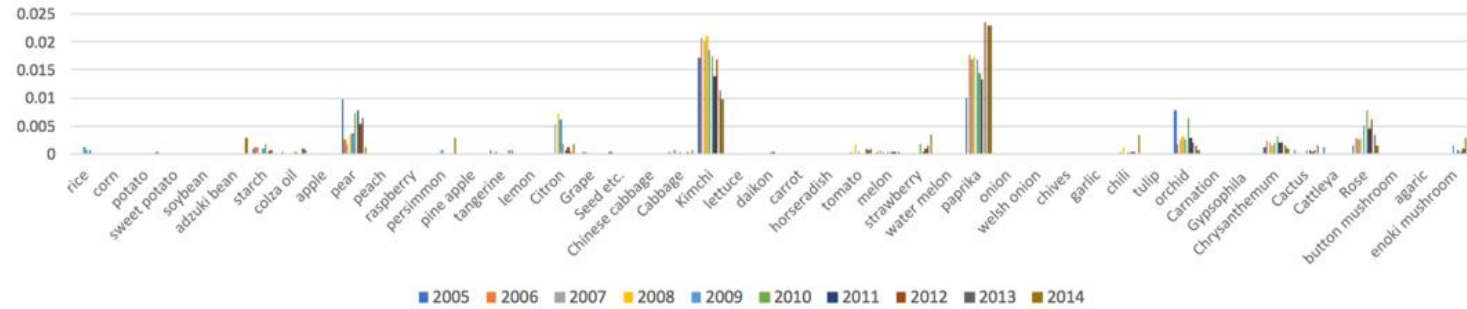


Fig. 5.4 Agricultural product community changes in 2005~2014

수출 품목 제거에 따른 응집력 변화는 다중 연결 시스템의 군집 형성에 미치는 영향력이며, 결과는 Fig. 5.5이다. 가공식품을 포함한 다중 연결 시스템에서의 응집력 변화는 0.001~0.025의 분포로 나타났으며, 배, 김치, 파프리카는 응집력 변화의 크기가 높은 품종이다. 파프리카는 2005년부터 2014년까지 응집력 0.010에서 0.023으로 상승한 유일한 품목이며, 이외 품목은 증가와 감소를 반복하는 것으로 나타났다. 신선 농산물에 의한 다중 연결 시스템에 응집력 변화는 0.001~0.130의 분포로 나타났으며, 배, 김치, 파프리카, 딸기, 토마토는 응집력 변화가 높은 품종이다. 신선 농산물에 의한 다중 연결 시스템의 응집력 변화는 분석한 모든 대상의 크기가 감소하였다.

(a) agricultural product trade network



(b) fresh agricultural product trade network

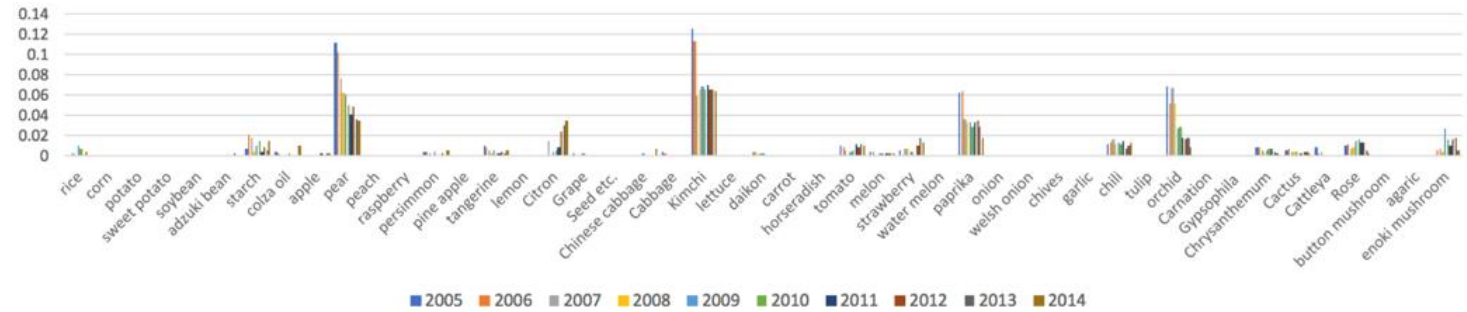


Fig. 5.5 Modularity changes by node elimination

농산물 수출 품목에 의한 다중 연결 시스템의 취약성 결과는 Fig. 5.6와 Fig. 5.7이다. Fig. 5.6는 가공 식품을 포함한 다중 연결 시스템을 대상으로 한 분석한 결과이며, Fig. 5.7은 신선 농산물에 의한 다중 연결 시스템을 대상으로 취약성을 평가한 결과이다. 가공 식품을 포함한 다중 연결 시스템의 형상모수는 2006년 2.57, 2008년 2.34, 2010년 1.93, 2014년 2.65로써 2012년까지 소폭 감소한 후 증가하는 것으로 나타났다. 가공 식품을 포함한 다중 연결 시스템의 지름은 2006년 0.5에서 2014년 0.4로 감소하였다. 가공 식품을 포함한 다중 연결 시스템은 2006년 20개 이하의 연결선을 가진 절점의 분포가 많으며, 2014년 약 30개 연결선을 가진 절점의 분포가 높았다. 또한 연결선 분포는 2006년 절점이 연결선을 독식하는 형태에서 2014년 절점들이 연결선을 고르게 가지는 형태로 변화였다.

신선 농산물에 의한 다중 연결 시스템의 취약성은 2006년부터 2014년까지 증가하는 것으로 나타났으며, 형상모수는 2006년 2.43, 2008년 2.38, 2010년 1.94, 2014년 1.91이다. 신선 농산물에 의한 다중 연결 시스템의 지름은 2006년 0.6에서 2014년 0.2로 감소하였다. 신선 농산물에 의한 다중 연결 시스템은 시기에 상관없이 약 11개의 연결선을 가진 절점의 빈도가 높게 나타났다. 연결선 분포는 2006년 대비 2014년 연결선의 많이 가진 절점의 수가 줄어드는 형태로 변화였다.

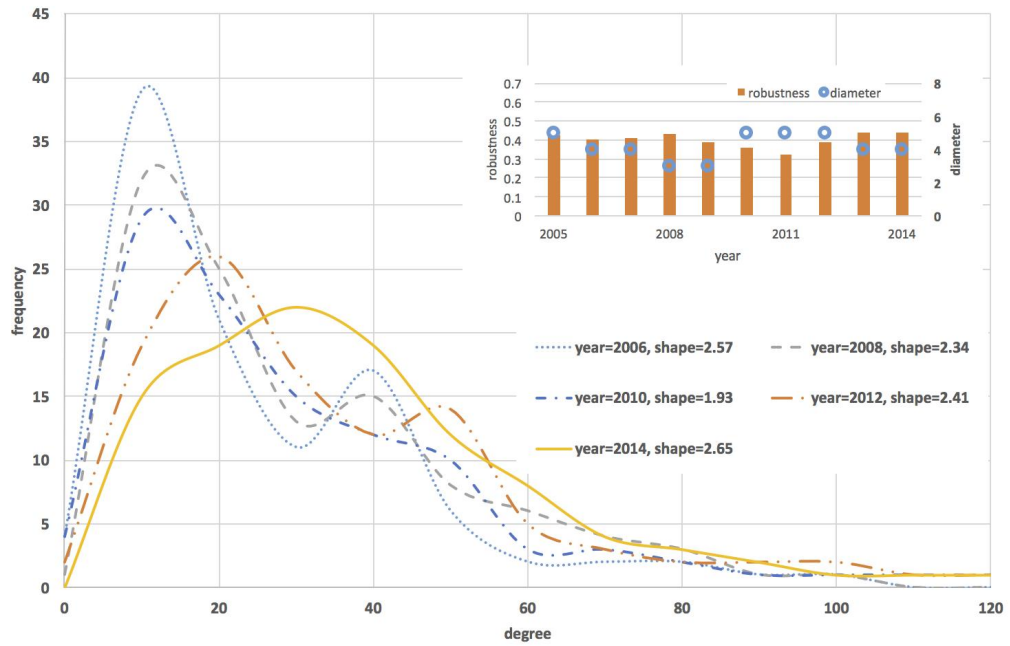


Fig. 5.6 Vulnerability of agricultural product export network

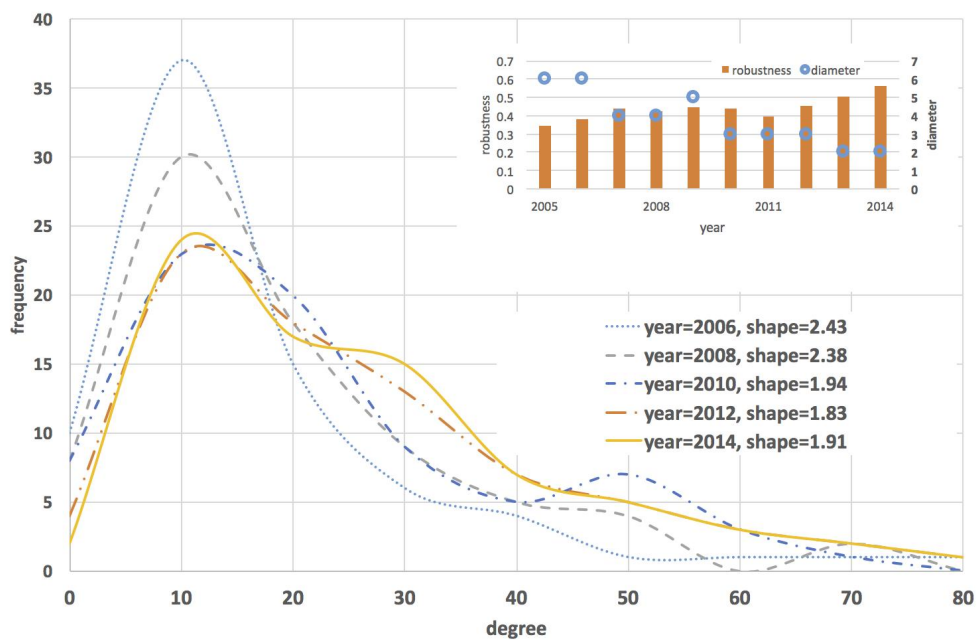


Fig. 5.7 Vulnerability of agricultural fresh product export network

농산물 수출 품목에 의해 구성된 다중 연결 시스템의 취약성 관련 인자는 프로비트 회귀분석(probit regression)을 통해 분석하였다. 종속변수는 취약성을 나타내는 형상모수이며, 독립변수는 월별 수출액 변화량, 중심성 변화, 전년 대비 수출액 변화 등이다(Table 5.4).

분석 결과, 취약성 관련 인자는 월별 수출액 변화량과 연결정도 및 근접정도의 변화로 나타났으며, 전년 대비 수출액과 국내 유통 가격 변화는 취약성과 관련이 없었다(Table 5.5). 신선 농산물에 의한 다중 연결 시스템은 정부 지원을 받는 품목의 중심성이 높았으며, 네트워크의 지름과 군집의 수는 2006년 대비 2014년 감소하였다. 신선 농산물에 의한 다중 연결 시스템의 취약성은 2006년보다 2014년 증가하였다. 회귀 분석 결과 연결정도와 근접정도 중심성 변화는 취약성에 영향을 주고 있으며, 수출 편중은 취약성 증가의 주요 요인으로 나타났다. 중심성이 높은 신선 농산물은 정부 지원을 받고 있었으며, 집중에 따른 편중은 취약성을 높이고 있었다.

Table 5.4 Variable description for probit regression

classification	variables	notes
dependent variable	shape factor	0(shape factor<2), 1(others)
	degree change	year-on-year
	closeness change	year-on-year
independent variable	change of export sale price	monthly
	exports compared to last year	year-on-year
	change of domestic sale price	monthly

Table 5.5 Result of probit regression about agricultural product export network vulnerability

variables	OR	s.e. OR	p-value
shape factor	-1.739	0.711	0.001
degree change	1.992	0.641	0.002
closeness change	1.426	0.592	0.004
change of export sale price	1.548	0.637	0.007
exports compared to last year	0.742	0.719	0.331
change of domestic sale price	0.819	0.841	0.286

5.1.3 고찰

국내 농산물 수출 증가는 농가 수익의 보장, 국내 농산물 유통 가격의 안정, 농산업의 새로운 성장 동력 등에 필요로 하고 있으며, 국가에서는 1990년대 이후 농산물 수출에 정책 지원을 실시하고 있다. 정책 지원의 효과는 2000년대 들어서면서부터 나타났으며, 2017년에는 100억 달러를 달성할 것으로 예상되고 있다. 그러나 국내 농산물은 가공식품이 수출을 주고하고 있을 뿐만 아니라 신선 농산물의 수출은 일부 품목 및 지역에 국한되고 있어, 수출 증가로부터의 나타날 수 있는 효과가 미비한 실정이다. 일부 신선 농산물 품목에 의해 주도되고 있는 국내 농산물 수출 환경의 문제점은 수출 품목들의 연결 관계를 대상으로 다중 연결 시스템의 취약성 모델을 활용하여 분석하였으며, 기존의 수출 증가 정책이 지속될 경우 발생할 수 있는 문제에 대해서 고찰하였다.

농산물 수출 품목에 의한 다중 연결 시스템의 취약성은 품목간 연결 구조를 고려한 형상모수에 의해 평가하였다. 평가 대상은 78개 농산물의 2005년부터 2014년까지 수출액 및 수출 지역의 자료로 구성된 혼합네트워크이다. 가공 식품을 포함한 다중 연결 시스템의 형상모수는 2006년 2.57, 2010년 1.93, 2014년 2.65였으며, 그 결과 취약성은 0.73, 0.82, 0.71로 평가되었다. 신선 농산물로 구성된 다중 연결 시스템의 형상모수는 2006년 2.43, 2010년 1.94, 2014년 1.91이었으며, 그 결과 취약성은 0.76, 0.80, 0.85로 평가되었다. 절점에 포함된 연결선 분포는 2006년보다 2014년에서 연결선을 독식하는 절점이 증가하는 형태로 변하고 있었다. 또한 신선 농산물의 품목으로 구성된 다중 연결 시스템의 응집력은 0.3에서 0.6으로 커졌으며, 지름은 6에서 2로 작아졌다.

다중 연결 시스템의 취약성 모델은 수출 품목 사이의 연결 구조로부터, 국내 농산물은 지속적으로 증가하였지만 수출 환경은 악화되고 있는 것으로 결과를 도출할 수 있었다. 가공 식품을 고려한 분석 결과에서는 취약성이 일정 시기를 제외하고 감소추세를 보이고 있는 반면, 신선 농산물만을 대상으로 한 취약성은 지속적으로 증가하는 추세를 보이고 있었다. 그리고 신선 농산물 품목의 연결 구조는 응집력 및 지름이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 정책 지원으로부터 일부 신선 농산물 품목이 수출의 증가를 이끌고 있는 현상은 국내 농산물 수출 환경을 개선하지 못하고 있는 것으로 유추할 수 있었다. 무엇보다 다중 연결 시스템의 취약성 평가 모델은 응집력 증가로부터 유추할 수 있는 정책 지원의 긍정적 효과의 반대급부인 수출 집중 품목으로부터 파생할 수 있는 위험성을 정량화 할 수 있었다.

5.2 가축 전염병 확산 연결 구조 취약성 해석

농가의 연결을 고려한 특정 지점의 관리는 가축 전염병 확산 억제 효과 높인다(Anderson and May, 1991; Keeling and Rohani, 2008). 네트워크 분석 기법은 다중 연결을 고려한 농가를 대상으로 주요 확산 지점의 도출에 유용한 것으로 알려져 있다(Albert et al., 2000; Keeling and Eames, 2005; Lloyd and May, 2001). 가중치 연결선을 고려한 네트워크는 간접 요인에 의한 확산이 이루어지고 있는 가축 전염병을 모사하는데 적합하며, 중심성이 큰 농가와 지역간 연결 농가의 관리는 가축 전염병 확산의 억제 효율성을 높일 수 있다(Fraser et al., 2004; Haydon et al., 2003; Krivitsky et al., 2009; Riley et al., 2003). 국내에서 발생하고 있는 HPAI(Highly Pathogenic Avian Influenza)는 가축 농가의 피해를 높이고 있는 대표적 가축 전염병이며, HPAI 확산 억제를 위한 관련 지점의 분석 방법은 요구된다(Lee et al., 2013).

Lee는 네트워크 분석 기법을 이용하여 연결을 고려한 주요 관리 농가를 도출하였으며 중심성이 높은 농가의 HPAI 확산 억제 효과를 밝혔다(Lee, 2014). 국내에서 발생한 HPAI는 유통 등 관련 업체들에 의해 전국으로 확산되어 피해의 규모가 커지고 있다(Seo et al., 2012). 네트워크의 군집 연결 절점 분석은 군집 단위의 전염병 확산을 억제하기 위해서 발생 지점으로부터 인접 군집으로의 연결 지점을 찾는 방법이다(Birtton et al., 2008; Eames, 2008; House et al., 2009; Shivakumar et al., 2012; Smieszek et al., 2009). Shu 등은 직접 접촉에 의한 전염병 확산에 군집 연결 절점을 활용하였으며, Gong 등은 군집 연결 절점을 이용하여 구제역 확산의 억제 효과를 밝혔다(Gong et al., 2014; Salathe and Jones, 2010; Shu et al., 2012; Xu et al., 2014). 그러나 군집 연결 절점을 활용한 방법은 연결선의 가중치를 고려하고 있지 않아 가중치 연결선을 포함한 네트워크를 대상으로

할 때 그 효율이 보장하기 어렵다(Hosseini et al., 2013; Danon et al., 201; Keeling et al., 2005). 따라서 PCBF를 이용하여 가중치 연결선 네트워크로 모사되는 가축 전염병 확산 경로를 분석하였고, 기존의 중심성 방법에 의한 경로 분석과 PCBF에 의한 경로 분석의 차이를 비교하기 위해서, 경로의 주요 절점을 제거하였을 경우 취약성을 분석하였다.

5.2.1 조류 독감 확산 네트워크 구성

PCBF 효과 분석에 사용된 자료는 농림축산검역본부에서 제공하는 HPAI 역학조사보고서이다. 자료는 농가 현황(Table 5.6, Table 5.8)과 농가의 역학조사 내용(Table 5.7)이며, 대상 농가는 98개이다. 농가 현황은 발병 농가(Infected Premise, IP) 및 양성 농가(Positive Premise, PP)의 접수일, 주소, 규모 등이다. 역학조사 내용은 농가의 소재지, 인근농가, 과거질병 여부, 농가 출입현황이다. 농가 출입현황은 유통, 사료,약품, 분뇨, 농가 주인의 방문 일시 및 횟수와 발병 농가의 출입 유무 및 발병 농가 정보이다. 발병 농가인 IP는 숫자가 낮을수록 발병 시기가 빠른 것을 의미하며, 양성 농가인 PP는 숫자가 낮을수록 초기에 처분한 것을 의미한다.

Table 5.6 Example of HPAI infected farmhouse current state data in 2008

classification / president	report date	address	breed	number of breed	diagnosis date	Id.
1 / Yoo, ○○	04.01	Kimje, Yongji Jeongu	layer chicken	151,50 0	04.03	IP1
2 / Kim, ○○	04.03	P, Yeung won	duck	17,000	04.07	IP2
1 / Hwang, ○○	04.05	Kimje, Yongji	duck	15,100	—	PP1
2 / Kim, ○○	04.09	Kimje, Yongji	layer chicken	30,000	—	PP2

Table 5.7 Example of HPAI infected farmhouse tracking data in 2008

Farm households(IP1)						
president	occurrence date	location	breeding condition	type	neighboring	record
Yoo, ○○	'08.04.01	Kimje, Yongji, Yongam	layer chicken 151,000	windowless, poultry house	3 poultry house within 500m	none
Access status of farm						
distribution	H firm, '06.12.27, '07.2.4, '07.4.10., '07.5.28 to 2 places located in Gyeonggi					
medicine	YH firm and SH firm, '08.3.31, '08.4.1					
feed	S firm and P firm					
fowl	'08.3.25					
Farm households(IP2)						
president	occurrence date	location	breeding condition	type	neighboring	record
Kim, ○○	'08.04.03	Jeongup, Yeungwon, Aengsung	duck 17,000	vinyl house	none within 500m	none
Access status of farm						
distribution	K firm, '08.4.2					
medicine	W firm, '08.3.31					
feed	M firm, '03.29, PH firm, 3.25					
fowl	Ch firm '08.3.31, '08.4.1					

Table 5.8 HPAI outbreak farm and region in 2008

region	Id.
Jeonbuk, Gimje	IP1, IP5, IP6, IP7, IP8, IP9, IP11, IP14, IP15, IP17, PP1, PP2, PP3, PP4, PP5, PP10, PP11, PP12, PP13, PP14, PP15, PP16, PP17, PP18, PP19, PP20, PP21, PP22, PP23, PP24, PP25, PP26, PP27, PP28, PP29, PP30, PP31, PP32, PP33, PP34, PP35, PP36
Jeonbuk, Sunchang	IP13, 40PP
Jeonbuk, Iksan	IP18, IP19
Jeonbuk, Jeongup,	IP2, IP3, IP4, IP16, PP6, PP7, PP8, PP37, PP38, PP65
Jeonnam, Yeungam	IP10
Gyunggi, Pyungtaek	IP12
Gyunggi, Anseong	IP25, IP27
Chungnam, Nonsan	IP20
Daegu, Suseung	IP23
Daegu, Donggu	PP59, PP60
Seoul, Gwangjin	IP24
Seoul, Songpa	IP31
Gangwon, Chuncheon	IP26, PP61
Busan, Gangseo	IP28
Busan, Gijang	IP29, PP53, PP63
Busan, Haeundae	IP30
Busan, Gangseo	PP62
Busan, Geomjeong	PP64
Gyungnam, Yangsan	IP32
Jeonnam, Naju	PP9, PP39
Ulsan, Ulju	IP21, PP44, PP45, PP46, PP48, PP49, PP50, PP51, PP52, PP54, PP55
Ulsan, Namgu	PP41
Ulsan, Bukgu	PP43, PP47
Ulsan, Junggu	PP42
Gyeongbuk, Gyungju	PP53, PP58
Gyungbuk, Gyungsan	IP33
Gyeongbuk, Yeongchun	IP22, PP56

PCBF의 확산 억제 효과 평가는 가축 전염병에 의한 다중 연결 시스템의 네트워크 모사, 2008년 발생한 HPAI 전파에 적용, SIR 이용한 전염병 발생한 임의 생성된 다중 연결 시스템에 적용으로 이루어진다(Fig. 5.8). 네트워크 모사는 농가를 절점으로 하며, 연결선은 가금 농가 관련 업체의 방문으로 구성된다. 연결선의 크기는 관련 업체의 전달력 정도와 방문 횟수에 의해 평가된다. HAPI 확산에 PCBF 적용은 가금 농가로 구성된 네트워크를 대상으로 군집 연결 절점을 산출하고, 실제 발생한 HPAI의 전파 경로는 군집 연결 절점에 의한 차단 여부를 분석으로 이루어진다. 다중 연결 시스템에 PCBF 적용은 무작위 네트워크와 척도없는 네트워크의 결합으로 네트워크 구성, SIR를 이용한 임의 절점 전염병 발생, 발생 지점으로부터 군집 연결 절점 도출 및 제거, 전염병 확산 정도 분석으로 이루어진다. 또한 PCBF와 중심성 분석의 효과 비교는 다중 연결 시스템에 SIR에 의한 전염병 발생, 중심성 높은 절점의 분석 및 제거, 전염병 확산 정도 분석으로 비교한다.

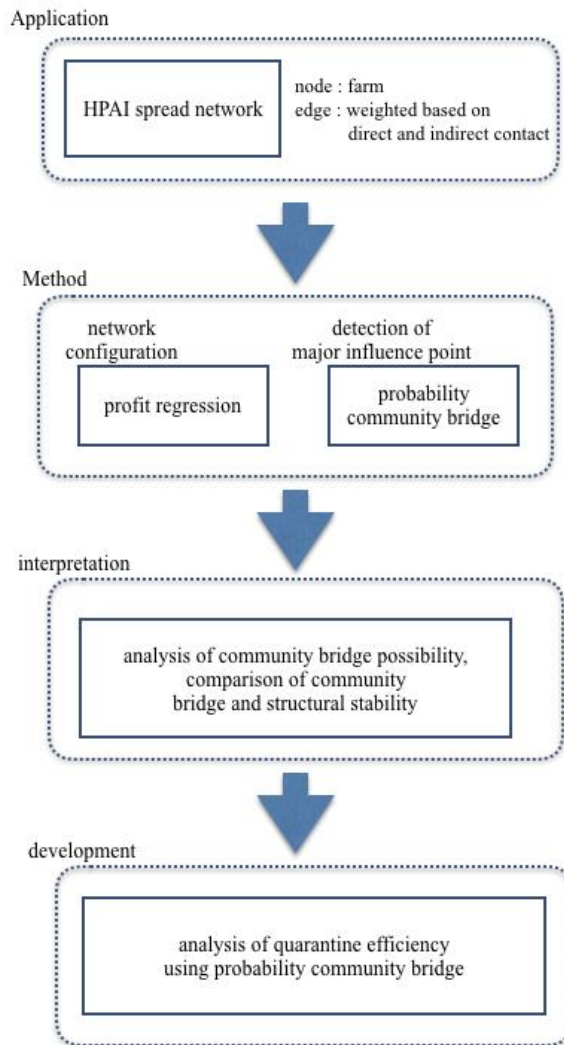


Fig. 5.8 Analysis of livestock epidemic spread
inhabitation efficacy by PCBF

HPAI 전파 네트워크는 가금 농가를 절점, 가금 농가 관련 업체의 방문을 이용하여 연결선으로 구성되었다. 연결선의 크기는 가금 농가 관련 업체의 방문 정도와 전달 정도로 나타냈다. 업체에 의한 전달 정도는 업체의 방문 횟수와 방문 농가의 HPAI 발병에 대한 프로빗 회귀분석(식 5.1)으로 산출했다. 대상은 98개 업체이다.

$$Y^* = X^T\beta + \epsilon \quad (5.1)$$

where, β : estimated by maximum likelihood

ϵ : error term, $N(0,1)$

가금 농가 관련 업체는 유통, 사료, 분뇨 처리, 약품이며, 프로빗 회귀분석 결과 유통, 사료, 약품 관련 업체는 HPAI 확산에 영향을 주는 것으로 나타났다(Table 5.9). 유통, 약품, 사료 업체의 p-value는 0.002, 0.005, 0.003로 나타났다. 농가 운영자에 의한 확산은 발병 농가 및 양성 농가 방문시 이루어지고 있으며, 농가 운영자간 접촉은 연결선 크기 1로 하였다. 분뇨 처리 업체의 p-value는 0.3이며, 분뇨 처리 업체 방문은 HPAI 확산에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Table 5.9 Odds ratio of farm-association (standard error of the odds ratio)

	With 4 association			With 3 association		
	OR	s.e. OR	p-value	OR	s.e. OR	p-value
β	-2.781	0.804	0.001	-2.216	19.025	0.000
shipment	2.191	0.783	0.005	2.382	9.405	0.002
waste	0.867	0.838	0.302		-	
medicine	1.795	0.671	0.007	1.877	7.972	0.005
feed	2.322	0.773	0.003	2.384	9.141	0.003

유통, 사료, 약품 업체에 의한 영향력은 식 5.2로 산출하였다. 그리고 거리 요소는 농가 운영자의 접촉에 의한 확산을 고려한 영향력 산정에 반영하였다. 농가 운영자의 접촉이 있을 경우, 확산은 접촉횟수를 농가간 거리로 나눈 값이다.

$$Z = -2.215 + 2.384 \times Dist + 1.879 \times Med + 2.385 \times Fe$$

$$P = \frac{1}{1 + e^{-Z}} \quad (5.2)$$

Where, *Dist* : frequency of distribution company

Med : frequency of medicine company

Fed : frequency of feed company

HPAI 확산 네트워크는 유통, 사료, 약품 업체, 농가 운영자를 절점, 농가 관련 업체 및 운영자의 접촉을 연결선으로 하며, 절점은 98개, 연결선은 144개로 나타났다. HPAI 확산 네트워크는 9개의 군집을 포함하고 있으며, 절점의 연결선 분포는 1~11개로 나타났다(Table 5.10). Fig. 5.10는 절점, 절점의 구분, 연결선, 군집을 표현하였으며, 배경에 표시된 색은 군집을 나타낸다.

Table 5.10 Community of HPAI outbreak region in 2008

classification	Id.
1	IP8, PP2, PP7, PP8, PP51, PP53, PP46, PP54
2	IP3, IP5, IP21, PP15, PP33, PP61, PP11
3	IP1, IP6, IP7, IP13, IP15, IP23, IP32, PP22, PP31, PP36, PP41, PP30, PP14, PP58, PP18, PP28, PP34
4	IP24, PP55
5	IP2, IP22, IP25, PP32, PP57, PP20, PP39, PP42
6	IP10, IP11, IP20, IP26, IP27, IP31, IP33, PP1, PP3, PP49, PP62, PP12, PP29, PP56, PP13, PP47, PP64, PP25
7	IP9, IP16, IP28, IP30, PP23, PP35, PP59, PP50
8	IP4, IP14, IP18, PP5, PP27, PP40, PP45, PP60, PP43, PP63, PP21,
9	IP12, IP17, IP19, PP4, PP6, PP52, PP65, PP37, PP38, PP19, PP24, PP48

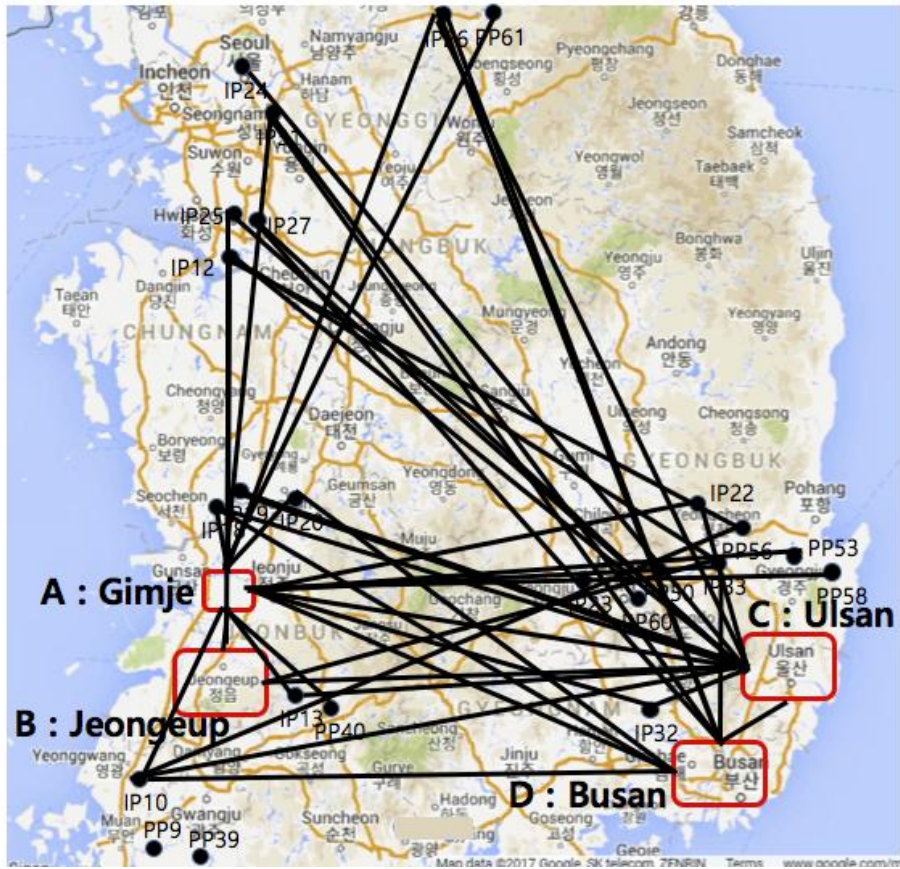


Fig. 5.9 HPAI outbreak region in 2008

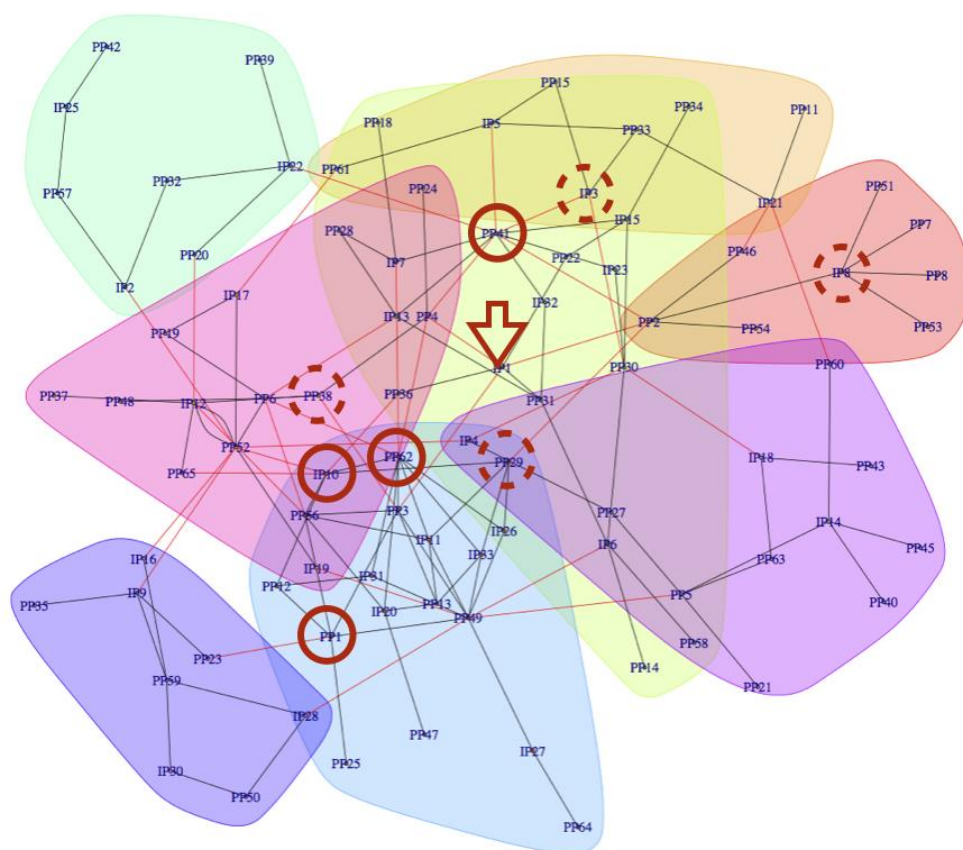


Fig. 5.10 HPAI spread network in 2008

5.2.2 조류 독감 확산 네트워크 취약성 분석

확산 억제 효과는 HPAI 확산 네트워크에서 중심성이 높은 절점과 PCBF의 결과가 높은 절점을 제거하였을 경우, IP1과 양성 반응이 나타난 지점인 PP의 연결이 되는지 여부로 평가하였다. Table 5.23은 IP1 절점과 1단계 간접 연결된 절점들의 PCBF 연결 정도와 연결정도의 중심성 크기를 나타낸 것이다. 1단계 간접 연결된 절점은 IP1과 직접 연결된 절점과 직접 연결된 절점이다. 예를 들어 IP1 절점은 PP2 절점과 연결되고, PP2 절점은 PP29 절점과 연결되어 있어, PP29 절점은 IP1 절점의 1단계 간접 연결 절점이 된다.

PCBF의 크기가 높은 절점은 PP29, PP38, IP13, PP8이며, 중심성이 높은 절점은 PP62, PP41, IP10, PP1이다. Fig. 5.22에서 화살표시는 발생 지점인 IP1 절점이며, 선으로 표시된 원은 중심성이 높은 절점, 점선으로 표시된 원은 군집 연결 절점이다. 중심성이 높은 절점은 IP1 절점으로부터 6번 군집(Table 5.12)을 차단하며, PCBF의 값이 높은 절점은 IP1 절점으로부터 9번 군집의 PP6, PP48, PP37, 1번 군집의 PP51, PP7, PP8, PP53을 차단한다. 차단은 대상 절점과 절점의 연결선을 제거하는 것이다. 6번 군집은 김제, 정읍, 춘천, 송파 등을 포함하고 있으며, 9번 군집의 PP6, PP48, PP37 절점과 1번 군집의 PP51, PP7, PP8, PP53 절점은 정읍 및 울주에 한정되어 있었다(Table 5.11).

4개 절점을 차단한 경우 HPAI 확산 네트워크에서 발병 지점인 IP1 절점으로부터 확산 억제 효과는 중심성이 높은 지역을 차단하는 것이 PCBF의 값이 높은 절점을 차단하는 것 보다 높았다. 차단 절점의 확대에 따른 HPAI 확산 억제 효과는 발생 지점인 IP 절점으로부터 차단 지점의 범위를 넓힘에 따라 IP 절점에 연결되지 않는 PP 절점의 수와 차단한 절점의 수이다. 차단 지점은 중심성 높은 절점과 군집 연결 절점 지점이다.

Table 5.11 Community bridge from IP1 using PCBF

Id.	degree	PCBF	distribution	
			mean	Std.
PP29	5	34.143	3.000	1.684
PP38	4	31.673	2.000	1.444
IP13	4	31.142	3.000	1.901
IP8	5	30.699	2.000	2.237
IP10	7	30.391	3.000	1.668
PP62	10	29.136	2.000	1.500
IP32	2	29.023	4.000	1.420
PP41	10	28.679	2.000	2.045
IP15	2	28.556	3.000	1.855
PP1	6	28.175	1.000	1.891
IP6	5	27.848	2.000	1.890
PP24	1	27.740	1.000	1.812

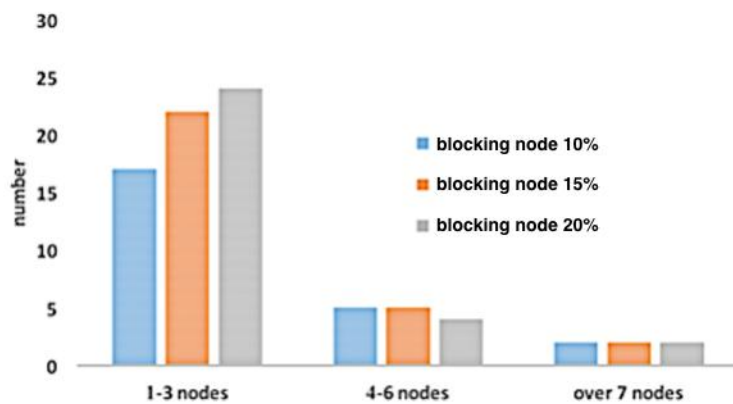
중심성이 높은 절점의 HPAI 확산 억제 효과는 차단 절점이 전체의 10% 일 때, 군집 연결 절점의 HPAI 확산 억제 효과는 차단 절점이 전체의 15% 일 때 가장 높았다(Table 5.12). 중심성이 높은 절점에 의한 확산 억제 효과는 차단 절점의 수가 많아짐에 따라 감소하였으며 차단 비율이 15% 이하에서 군집 연결 절점 보다 높게 나타났다.

Table 5.12 Efficacy according to HPAI blocking coverage

	Top 10% blocking		Top 15% blocking		Top 20% blocking	
	community bridge	centrality	community bridge	centrality	community bridge	centrality
PP	24	46	41	58	63	60
blocking node	9	9	14	14	19	19
efficacy	2.667	5.111	2.929	4.143	3.316	3.158

중심성이 높은 절점과 PCBF의 값이 높은 절점의 차단은 군집의 수 및 소속 절점을 변경시킴에 따라 HPAI 확산 억제에 효과를 나타낸다. 군집의 절점 수는 군집으로 HPAI가 전파 되었을 경우 피해의 정도를 가늠할 수 있는 있다. Fig. 5.11은 중심성이 높은 절점 및 군집 연결 절점에 의한 차단에 따른 군집 및 소속 절점의 수 변화이다. 중심성이 높은 절점의 차단은 군집 연결 절점에 의한 차단보다 4~6개 절점을 포함한 군집을 약 5개 7개 절점 이상을 포함한 군집을 약 2개 더 만들었다. 군집 연결 절점에 의한 차단은 중심성이 높은 절점이 의한 차단보다 1~3개 절점을 포함한 군집의 수를 더 많이 생성하였다.

(a) PCBF



(b) centrality

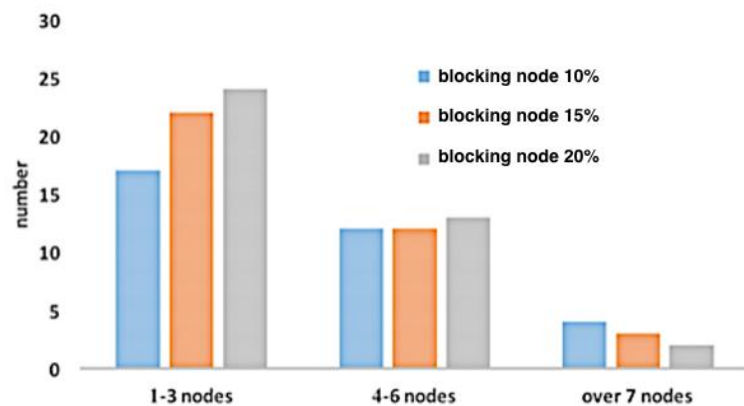


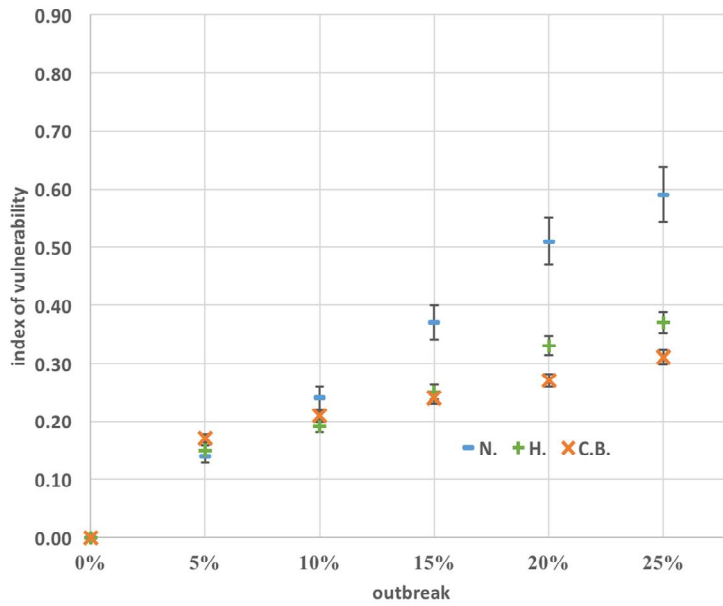
Fig. 5.11 Comparison of network community changes by blocking nodes

다중 연결 시스템의 따른 일반적 절점, 중심성 높은 절점, PCBF의 값이 높은 절점에 따른 차단 효과는 Fig. 5.12, Fig. 5.13이다. 각 방법에 따른 효과 비교는 네트워크의 크기와 무작위 네트워크 및 척도없는 네트워크 결합 비율을 변경하여 나타냈다. 동시 발병 범위는 전체 절점의 5~25%이다. 다중 연결 시스템은 형상 계수가 5인 무작위 네트워크 2개, 형상 계수가 1.5인 척도없는 네트워크 2개, 형상계수가 3인 무작위 네트워크 2개이다. 다중 연결 시스템 규모인 절점은 100개와 400개이고, 연결선의 분포는 절점의 3배이다. 다중 연결 시스템의 차단 지점은 중심성과 PCBF의 값의 정도가 발생지점으로부터 1단계 인접한 절점 중 상위 30%이다. 전염병 확산은 몬테카를로 시뮬레이션 기반인 SIR 모델을 이용하였으며, 회복은 없는 것으로 가정한다.

무작위 네트워크와 척도없는 네트워크를 50% 비율로 결합한 다중 연결 시스템에서 전염병 확산 억제는 동시 발병 범위가 15% 이하인 경우 중심성이 높은 절점 차단의 효과가 높았다(Fig. 5.13). 중심성이 높은 절점에 의한 효과는 절점이 100개인 다중 연결 시스템에서 높았으며, PCBF의 값이 높은 절점 차단은 다중 연결 시스템 규모 변화에도 효과가 약 3으로 동일하게 나타났다. 15% 이상의 동시 발병인 경우, 군집 연결 절점에 의한 차단은 중심성이 높은 절점에 의한 차단보다 약 20% 효과가 높았다.

척도없는 네트워크의 비율이 20%인 다중 연결 시스템에서 전염병 확산 억제는 중심성이 높은 절점의 차단 효과가 높게 나타났다. 절점이 100개인 다중 연결 시스템에서 확산 억제는 동시 발병 20% 이하에서 중심성이 높은 절점 차단의 효과가 높았으며, 절점이 400개인 다중 연결 시스템에서 확산 억제는 10% 이하 동시 발병 범위에서 중심성이 높은 절점 차단의 효과가 높은 것으로 나타났다. 15% 이상 동시 발병이 발생한 400개 절점으로 구성된 다중 연결 시스템에서 PCBF의 값이 높은 절점에 의한 차단 효과가 높은 것으로 나타났으며, 중심성에 의한 차단과의 차이는 약 5%이다.

(a) network constructed by 100 nodes



(b) network constructed by 400 nodes

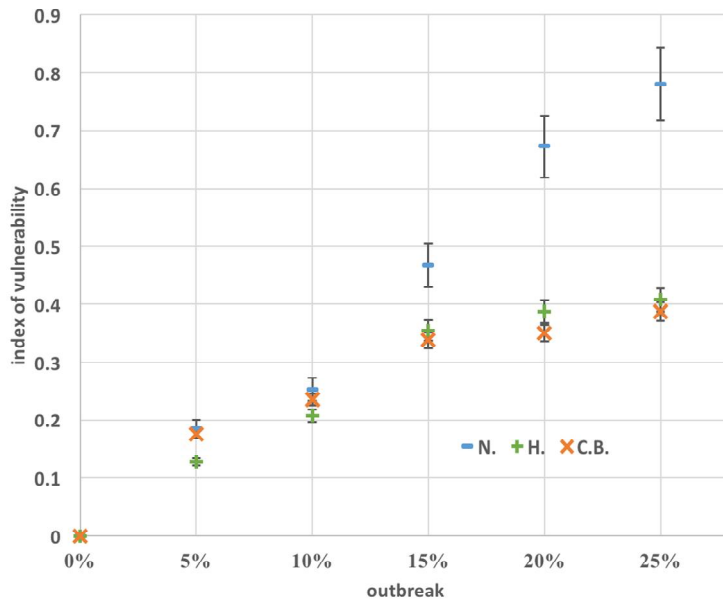
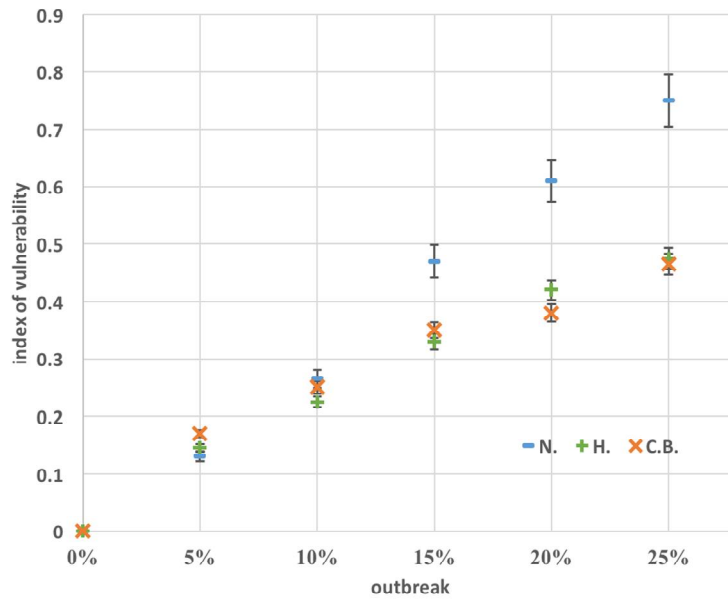


Fig. 5.12 Efficacy of real network within 50% random network and 50% scale-free network by blocking nodes

(a) network constructed by 100 nodes



(b) network constructed by 400 nodes

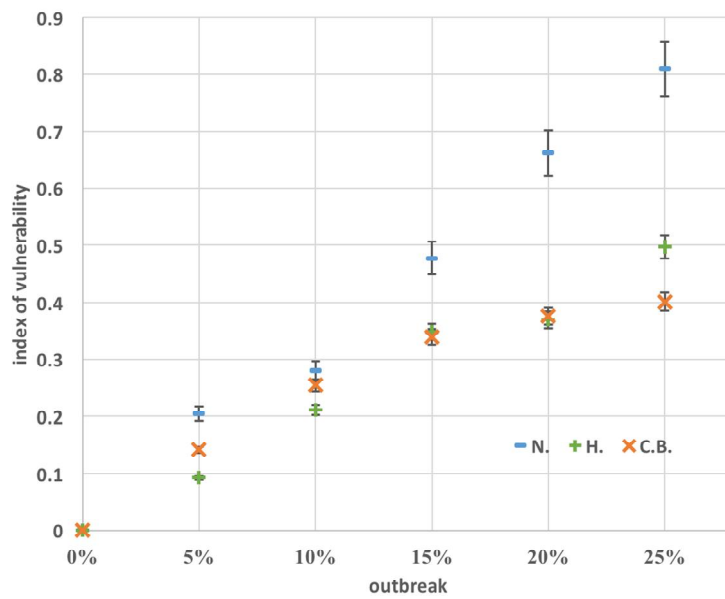


Fig. 5.13 Efficacy of real network within 80% random network and 20% scale-free network by blocking nodes

5.2.3 고찰

가금 농가를 대상으로 발생하고 있는 가축 전염병인 HPAI는 발병 시기가 일정하지 않게 되고 있을 뿐만 아니라 확산 속도가 빨라, 농가에 많은 경제적 피해를 주고 있다. 기존에는 농가 피해를 줄이기 위해서 HPAI 발병 농가로부터 일정 거리 안에 있는 인접 농가를 대상으로 방역을 실시하고 있었다. 일정 거리에 위치한 전체 농가에 대한 HPAI 확산 억제 방안은 효과가 높지 않을 뿐만 아니라 농가의 경제 손실을 높일 수 있는 가능성이 있어, 네트워크 분석 기법을 활용한 발병 농가의 주변 농가 중 인접 농가와 연결이 많이 된 농가를 우선적으로 방역하여 확산 억제 방안의 효과를 높이고자 하였다. HPAI 확산은 연쇄적 반응 중 하나의 현상으로서, 본 연구에서 고찰한 연쇄적 반응의 확률 경로를 토대로 HPAI의 확산 억제 방안을 제시하였다. 그리고 인접 농가와 연결 정도를 토대로 한 HPAI 확산 억제 방안과 연쇄적 반응의 확률 경로를 활용한 HPAI 확산 억제 방안의 효과는 농가의 연결 구조를 대상으로 한 다중 연결 시스템의 취약성 평가 결과로 비교하였다.

각 방법에 의한 HPAI 확산 억제 효과는 발병 지점으로부터 인접한 지점을 차단으로부터, HPAI 발병이 나타나지 않은 지역의 개수로 비교하였다. HPAI 발병 지점으로부터 차단한 지점은 인접 농가와 연결이 많이 되어 중심성이 높은 지역과 PCBF에 의한 연쇄적 반응의 주요 경로에 위치한 절점이다. 2008년 발생한 HPAI 자료를 토대로 모사한 확산 네트워크는 농가를 절점, 농가 관련 업체의 방문을 연결선 구성하였으며, 2008년 HPAI에서의 확산 억제 효과는 중심성이 높은 지점을 차단하는 것이 연쇄적 반응의 주요 경로를 차단하는 것 보다 높았다. PCBF에 의한 연쇄적 반응의 주요 경로에 위치한 절점은 2008년 발생한 HPAI를 모사한 네트워크에서 20% 이상 차단하였을 경우, 중심성이 높은 절점보다 억제 효과가 높았다. 임의로 생성한 HPAI 확산 네트워크의 취약성은 규모가 크고 척도없는 네트워크

비율이 낮은 경우, 연쇄적 반응의 주요 경로에 위치한 절점을 차단하는 것이 중심성이 높은 절점 차단하는 것 보다 커졌다. 따라서 PCBF에 의한 연쇄적 반응의 주요 경로에 위치한 지점을 활용한 확산 억제 방안은 규모가 크고, 연결을 독식하는 지점의 수가 작은 가축 전염병 확산 다중 연결 시스템의 경우에 적합하였다.

5.3 구조물 응력경로 효율성 해석

5.3.1 불규칙 삼각망과 네트워크 구조 확률 함수의 관계

응력 경로는 외부에 저항하는 내력의 크기 및 흐름을 판단할 수 있는 자료이며 구조해석에 있어 구조물 단면의 크기와 철근배치와 같은 설계에서 사용된다(Lee, 1991; Yoon, 2011). 트러스와 Strut and Tie는 응력 경로는 해석하는 방법이며 구조물의 이산화가 필요하다(Hong, 1996; Gurdal and Tatting, 2000; Lee et al., 2012; Kim et al., 2014; Steven and Xie, 1993). 불규칙 삼각망은 해석 대상의 위치에 따라 절점의 수를 달리하여 이산화를 하는 방법이며 결과의 정확도를 높이고 분석 시간을 단축하는데 유용한 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2004; Lee, 2014; Long et al., 1995).

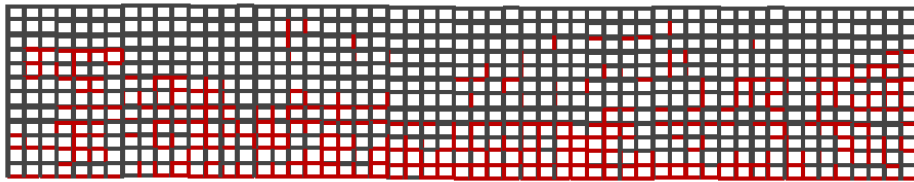
이산화에 의한 응력 경로의 해석 시간은 구조물의 대상의 절점과 연결선 분포에 의해 영향을 받고 있다(Bath, 2006; Fefferman, 1970; Guimera et al., 2003; Leskovec et al., 2010; Peter et al., 2010). Lee는 네트워크의 중심성 분석 기법을 이산화에 적용하여 불규칙 삼각망에서 절점의 연결선 분포로부터 해석 시간이 단축될 수 있음을 밝혔다(Lee, 2014). 그러나 불규칙 정도에 따른 삼각망에 의한 해석 시간의 변화는 응력 경로의 정확도와 분석의 효율성을 높이기 위해서 필요하다(Dechter and Pearl, 1989; Friedman et al., 1997; Friedman, 2004; Haldar and Mahadevan, 2000; Ooi et al., 2012).

구조물 이산화에서 불규칙 삼각망(Triangulated Irregular Network, TIN)은 절점이 포함하고 있는 연결선의 분포를 불균등하게 이산화 하는 방법이다. 기존 불규칙 삼각망의 절점의 연결선 분포보다 더 높은 불균등을

가진 절점은 응력 경로 해석의 시간을 단축할 수 있다(Lee, 2014). 절점에 포함된 연결선 분포는 감마 분포의 형상모수로 표현된다. 형상모수는 삼각망의 불규칙 정도를 나타낼 수 있다. 따라서 불규칙 삼각망을 이용한 응력 경로 해석 효율성은 응력 경로 해석 시간과 형상모수의 비교로 분석가능하다.

응력 경로 해석은 단순보를 대상으로 수행하였다. 단순보의 재료는 등방성(Isotropic)과 균질성(Homogeneous)을 갖는 이상적인 재료이며, 해석은 2차원 단면을 대상으로 한다. 단순보의 형태는 보의 높이가 3.0m이며 보의 지간길이는 15.0m이며 5.0kN/m의 분포 하중이 모든 상황에서 동일하게 구성된다(Fig. 5. 14).

(a) quadrilateral mesh



(b) TIN mesh

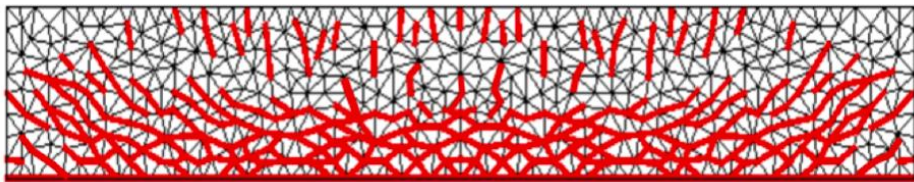


Fig. 5.14 Stress path in simple beam

5.3.2 확률 함수의 구조물 응력경로 효율성 해석

부피와 변형에너지를 이용해서 가장 효율적인 형상을 결정할 수 있는 수행지수 (Performance Index)를 이용하여 합리적인 종료기준을 이용한 최적화 과정을 수행하였다 (Hinton, 1995).

$$\frac{e_{ele}}{e_{max}} > RR_i \quad (5.3)$$

RR은 삭제율이며 식(5.3)을 통해서 이 기준에 부합하지 않는 요소는 불필요한 요소로 매 단계별로 삭제하였다. 그리고 수행지수는 식(5.4)와 같고,

$$PI = \frac{1/W_i V_i}{1/W_0 V_0} = \frac{W_0 V_0}{W_i V_i} \quad (5.4)$$

변형에너지의 밀도와 전체 요소의 수를 이용하여 단계별 모델의 효율성을 평가할 수 있다.

단순보의 이산화는 삼각망의 형태를 불규칙 상태에서 규칙 상태로 변화시켜가며 PI의 값을 관찰하였다(Fig. 5.15). 형상모수는 삼각망의 불규칙 정도를 나타내는 절점이 포함된 연결선 분포를 나타냈으며, 이산화의 최대 절점 수는 응력 경로 해석의 오차가 공학적으로 충분히 허용 가능한 10^{-3} 이하가 될 때의 크기로 정의하였다. 앞에서 언급한 모든 과정을 Fig. 5.15에 요약하였다.

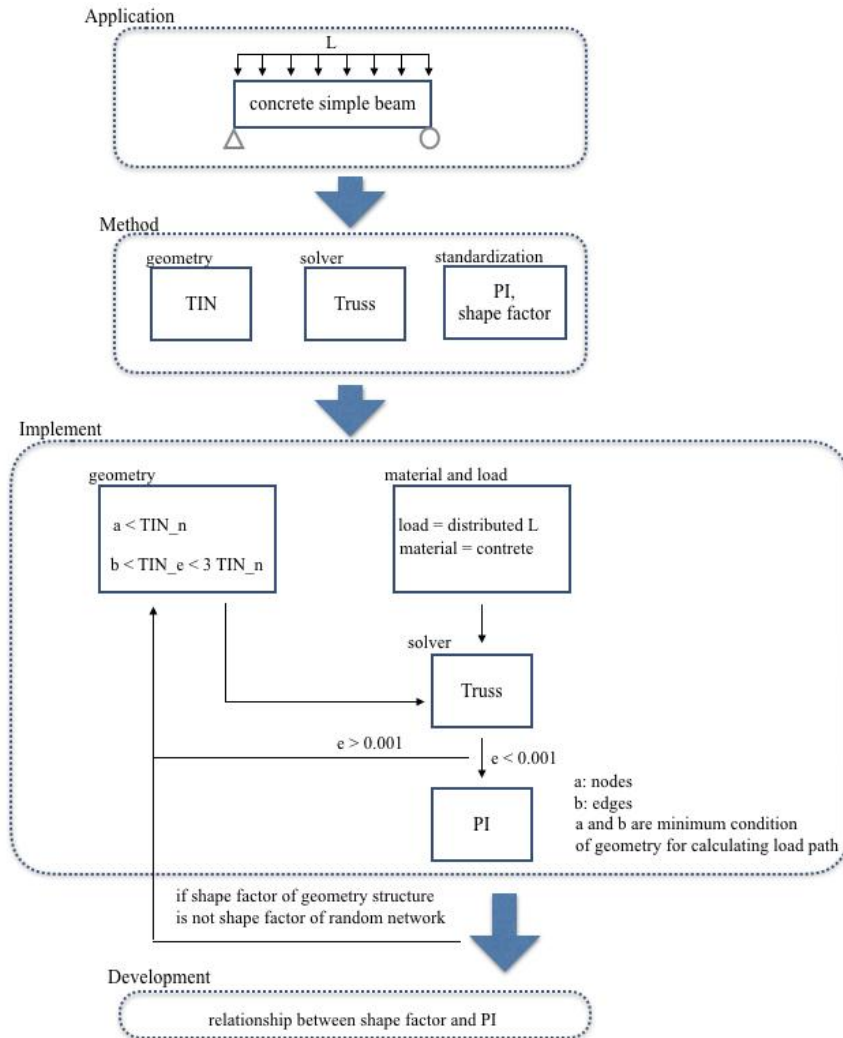


Fig. 5.15 Analysis of stress path calculation efficiency according to TIN irregular degree

응력 경로의 해석이 가능한 불규칙 삼각망은 형상모수 범위가 약 4에서부터 9로 나타났다. 규칙 삼각망의 절점에 포함된 연결선 분포의 형상모수는 약 9이며, 규칙 삼각망은 무작위 네트워크에 유사한 형태이다. 응력 경로 해석이 불가능한 불규칙 삼각망의 절점에 포함된 연결선 분포는 형상모수가 4 이하인 경우이며, 응력 경로 해석은 오차율로 인하여 반복 횟수가 증가하였다. PI의 값은 최솟값 100, 최댓값은 123으로 나타나서 형상모수의 값이 노드 수가 상대적으로 많이 요구되는 정밀 갈라짐(Choi, 2014) 등을 묘사하는 경우에는 매우 중요함을 알 수 있었다(Fig. 5.16).

PI와 형상모수의 크기는 삼각망의 불규칙 정도에 따라 Fig. 5.16과 같이 나타났다. Fig. 5.16의 가로축은 30에 가까울 경우 삼각망의 불규칙 정도가 높은 것이며, 140에 가까울 경우 삼각망의 불규칙 정도가 낮은 것을 의미한다. 30 이하의 가로축은 응력 경로 해석이 되지 않은 불규칙 삼각망이다. PI는 가로축의 크기가 약 85에서 가장 큰 것으로 나타났으며, 형상모수는 가로축의 크기가 약 110에서 가장 크게 나타났다. 따라서 형상모수와 PI의 관계를 알아볼 필요가 있으며, 그 변화는 Fig. 5.17에 나타내었다. 형상모수와 PI 비교는 삼각망의 불규칙 정도인 특정 절점에 포함된 연결선을 정도에 따른 응력 경로 효율성을 분석하는 것이 목적이다.

Fig. 5.17의 가로축은 형상모수인 삼각망의 불규칙 정도이며, 세로축은 해석 효율성인 PI이다. PI는 형상모수가 작을수록 값은 하락하였지만, 불규칙 삼각망 중 구조해석에 유리한 델로니 삼각망 전후까지는 상승하는 모습을 보였다. 특히, 형상모수가 6인 지점에서 가장 크게 나타났다. 이는 델로니 삼각망에 의한 불규칙 삼각망은 절점에 포함된 연결선의 수가 6개인 것이 가장 효율적인 것을 의미한다. 이후 연결선의 수가 8개인 부분에서 한번 더 높은 PI 값을 보여주었다. 구조해석을 수행하는데 있어 8개의 모수를 가진 델로니 삼각망을 구성하는 방법도 유리할 수 있지만, 복잡한 형태를 일부러 구성하여 수행할 경우 복잡도만 증가하였다. 다음의 방법은 추천하

기 곤란한 경우로 여기진다. 실제 모든 데이터는 8개의 모수에서 항상 빠른 해석 수행 과정이 진행함은 불가능함을 알 수 있다.

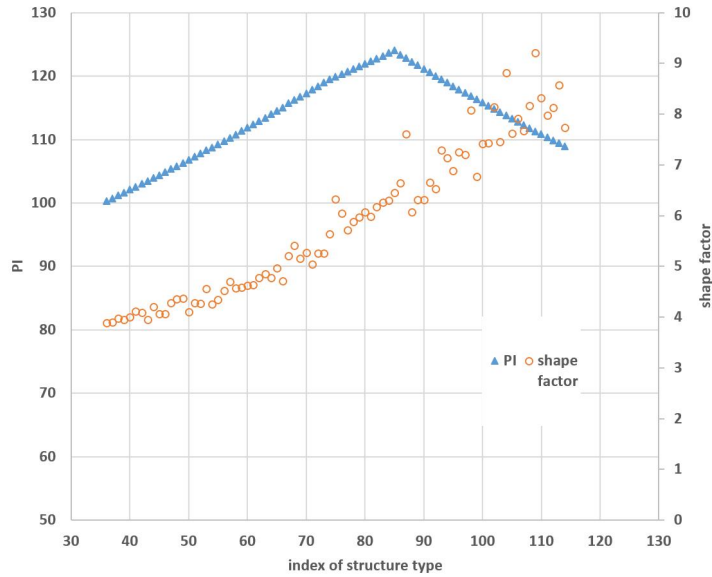


Fig. 5.16 Changes of PI and shape factor according to TIN irregular degree

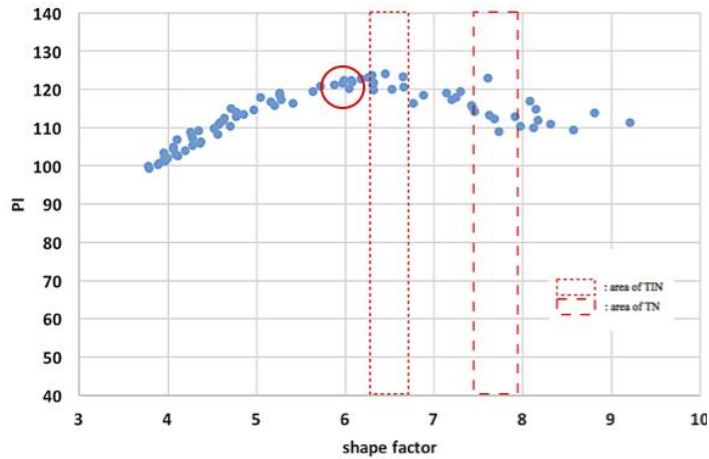


Fig. 5.17 Relationship between shape factor and PI

5.3.3 고찰

삼각망의 불규칙 정도는 절점에 포함된 연결선의 분포로 나타낼 수 있어 감마 분포의 형상모수로 표현하였다. 해석의 효율성인 PI는 단순보를 대상으로 삼각망의 불규칙 정도에 따른 응력 경로 해석의 경과 시간으로 나타냈다. PI는 형상모수가 약 6인 구간에서 크며, 삼각망의 불규칙 정도는 연결선을 8개까지는 절점의 분포가 높은 형태였다. 구조해석을 수행하는데 있어 6개가 의미하는 기하학적 물리적인 의미는 다음과 같이 설명할 수 있다 (Fig. 5.18). 2차원 직각 좌표계에서 존재하는 미소요소에 작용하는 응력을 최소한의 요소로 표현한 것이다. 참고로 이를 유도하는 과정을 들여다보면, 힘의 합이 0이며, 모멘트의 합이 0인 과정을 통해서 총 6개의 응력만 표현된다. 이와는 별도로 이번 연구에서 진행한 2차원 네트워크 방법을 이용하더라도, 한 절점에서 6개의 선분을 가진 경우가 최적의 해를 가장 효율적으로 찾아나감을 보여주었다. 이를 계기로 2차원 직각 좌표계에서 표현된 미소요소와 등가를 보여주는 네트워크의 절점당 선분 개수는 6개가 등치임을 이 연구를 통해서 통계적으로 보여주었다. 따라서 Strut-and-Tie 모델, Evolutionary Structural Optimization(ESO), 등가구조체 변환을 이용한 정밀 크랙묘사 등의 연구에서 불규칙 삼각망을 이용할 경우 한 절점 당 6개 정도로 생성하는 것이 가장 효율적인 방법으로 최적의 해를 찾아갈 수 있음을 의미한다. 이를 3차원으로 확장하면 3차원 미소요소와 등가의 네트워크를 구성하기 위해서는 한 점에서 총 18개의 선분이 필요함을 유추해 볼 수 있다. 이는 향후 연구를 통해서 증명해 보일 수 있을 것으로 판단한다.

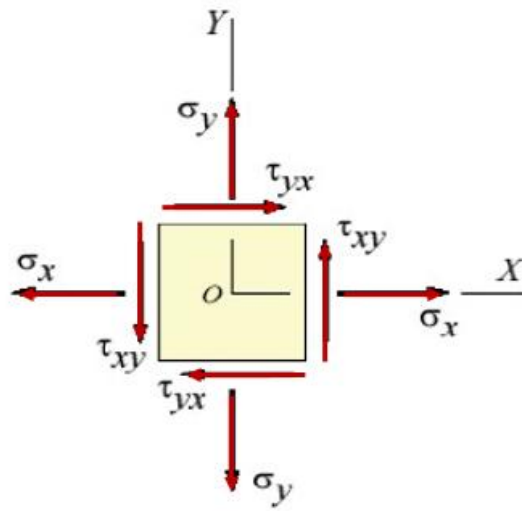


Fig. 5.18 Elements in plane stress

제6장 결 론

본 연구에서는 복잡한 현상을 모사한 가중치 연결선과 동종 절점으로 구성된 다중 연결 시스템의 취약성을 해석하였다. 개발한 모델은 다중 연결의 구조를 고려한 취약성 분석과 발생 지점으로부터 연결 구조를 고려한 군집 연결 절점의 확률 해석으로 이루어졌다. 다중 연결 시스템 취약성 모델은 농산물 교역량 자료를 대상으로 검증을 평가하였다. 개발한 모델은 농산물 수출 품목의 편중에 따른 취약성, 가축 전염병 확산 억제를 위한 취약 지점, 연속체와 등가의 거동을 보이는 이산체인 불규칙 삼각망의 응력 경로 해석의 효율성을 분석함으로써 다중 연결 시스템에서 발생할 수 있는 문제의 해결방안을 제시하였다.

1. 다중 연결 시스템의 취약성 모델은 PCBF에 의한 취약 지점의 확률 해석과 연결 구조를 고려한 취약성 분석으로 구성되었다. PCBF는 랜덤워크 기반 군집 연결 절점을 분석하는 방법을 토대로 확률과 컨볼루션을 적용한 방법이다. 기존 랜덤워크 기반 방법은 전체의 네트워크 연결 정보가 알려지지 않은 조건에서 군집 연결 절점을 찾는 이점이 있지만 가중치를 고려하고 있지 않았다. 본 연구에서 개발한 PCBF는 절점에 확률을 적용하고 기존 방법을 토대로 연쇄적 반응의 진원지로부터 가능한 경로를 도출하였다. 또한 경로에 있는 절점들의 확률은 컨볼루션으로 표현가능하며, 확률의 크기를 토대로 군집 연결 절점을 분석하였다.

2. PCBF 검증은 몬테카를로 시뮬레이션으로 분석한 군집 연결 절점과 비교하였다. PCBF 검증을 위한 대상은 사과, 배, 버섯의 국가간 교역량 통계자료를 이용하였다. 그 결과 검증에 사용된 다중 연결 시스템에서 오차율은 7.25%이고, 농산물 교역 자료에 의한 다중 연결 시스템에서의 오차율은 5.59%~8.55%로 모든 경우 오차율이 10.00% 이내에 있기 때문에 본 연구에서 개발한 PCBF 방법은 매우 유용하다고 판단할 수 있었다.
3. 기존 연구는 절점에 포함된 연결선 분포가 변동하기 때문에 반복계산을 통해서 진행하는 방법을 취하기에 해석 시간이 많이 걸리는 단점이 있지만, 감마 분포를 이용한 취약성 평가는 형상모수의 크기로 취약성을 한 번에 도출할 수 있다. 또한 절점에 포함된 연결선 분포도 고려할 수 있는 장점이 있으며, 동일한 크기의 다중 연결 시스템은 무작위 네트워크와 척도없는 네트워크의 결합 비율에 따라 취약성이 변하게 된다. 네트워크의 절점에 포함된 연결선 빈도는 감마 분포로 표현하였으며, 감마 분포의 형상모수는 연결선 분포의 형태를 표현할 수 있었다. 그 결과 다중 연결 시스템에서 형상모수와 취약성의 관계는 지수 함수로 나타났다. 이러한 지수 함수는 다중 연결 시스템에서 자료의 개수가 부족하더라도 자료가 있더라도 미래 예측이 가능할 것으로 보인다.
4. 다중 연결 시스템의 취약성을 평가하는 지수 함수의 적합성을 살펴보기 위한 대상은 버섯, 배, 사과의 교역량 자료이다. 지수 함수에 의한 취약성의 적합성 평가는 반복 계산에 의한 취약성 크기와 비교하였다. 반복 계산한 취약성과 지수 함수에 의한 취약성의 오차율은 0.04%~0.07%이었다. 따라서 형상모수를 독립변수로 하는 지수 함수에 의한 취약성 평가는 적합하였다.

5. 농산물 수출 품목에 의한 다중 연결 시스템 취약성 평가는 수출지원 정책이 본격적인 2008년을 포함하여 2005년부터 2014년까지의 주요 78개 농산물 품목을 대상을 적용하였다. 가공 식품으로 구성된 다중 연결 시스템의 형상모수 크기는 2006년 2.57, 2010년 1.93, 2014년 2.65였다. 가공 식품으로 구성된 다중 연결 시스템은 2011년부터 절점에 포함된 연결선의 집중이 해소됨에 따라, 취약성은 2010년까지 지속적으로 증가하였지만, 이후 감소하여 2014년 가장 작은 값을 나타냈다. 이와 더불어 신선 농산물 품목으로 구성된 다중 연결 시스템의 형상모수는 2006년 2.43, 2010년 1.94, 2014년 1.91로 산출되었다. 신선 농산물 품목에 의한 다중 연결 시스템의 취약성은 2014년도까지 지속적으로 높아졌다. 이는 절점에 포함된 연결선 분포가 증가하는(연결선을 독식하는) 형태로 변화했기 때문이다. 이는 국내 신선 농산물은 일부 상품만이 수출을 주도 하고 있다는 것을 의미하기 때문에, 앞으로 수출품목을 다각화 하고 수출국가도 다변화 시키는 정책지원이 되어야 갑작스런 무역장벽에 대비할 수 있을 것이다. 본 모델은 형상모수의 취약성 평가를 정량화하여 시기별 변화를 나타낼 수 있을 것으로 보인다.

6. PCBF는 다중 연결 시스템에서의 확률적 취약 지점을 분석하였으며, 가축 전염병 확산에서 취약 지점은 발생 지점으로부터 인근 지역을 차단하는 수단으로 사용되었다. 확산 차단 효과 비교 대상은 2008년 발생한 HPAI의 역학조사 자료이다. 2008년 발생한 HPAI로 구성된 다중 연결 시스템에서 확산 차단은 네트워크의 중심성이 높은 지점을 차단하는 것이 높은 효과를 나타냈다. 또 다른 예제로는 복잡도가 높은 다양한 가축 전염병을 포함하는 SIR 모델의 전염병 확산을 모의해 보았다. 그 결과 PCBF에 의한 군집 연결 절점의 확산 억제는 HPAI 확산 네트워크에서 차단 지점 비율이 20%인 경우, 다중 연결 시스템에서 규모가 큰 경우, 절점에 포함된 연결선 수의 비율이 낮은 경우에

중심성이 높은 절점의 차단 보다 효과적이다. 그러므로 가축 전염병 발생 지역 및 빈도가 증가될 경우, 확산 억제 지점은 중심성 분석을 이용하는 것보다 PCBF가 더욱 효과적일 것이다.

7. 불규칙 삼각망은 응력 경로 해석의 시간을 단축하는 이산화 방법이다. 형상모수는 삼각망의 불규칙 정도인 절점에 포함된 연결선 분포를 나타냈다. 텔로니에 의한 불규칙 삼각망은 절점이 가진 연결선의 빈도가 약 6개인 경우 가장 높았다. 또한 형상모수가 약 6인 구간에서 PI는 가장 크게 나타났다. 이와는 별도로 외부의 힘에 저항하는 솔리드 구조체의 사각형 미소 요소에 작용하는 응력의 총 개수는 6개인데 앞에서 언급한 텔로니 삼각망에서 각 절점 당 6개의 연결선이 필요하다는 내용과 일치한다. 이는 연속체와 등가인 불규칙 삼각망 구조체를 구성하는데 있어서 한 절점을 중심으로 생성되는 최소한의 선분 개수는 6개가 되어야 함을 알 수 있다. 물론 형상모수가 8 근처에서도 상당히 높은 PI 값이 도출되었지만 구조해석을 수행하는데 있어서 불필요한 요소는 최소로 하는 것이 효율적인 방법임으로 본 연구에서 유도한 6개의 연결선은 의미하는 바가 크다. 기존 연구와는 다르게 연결선을 어떻게 정의하는 것이 합리적인지에 대한 정확한 이유를 네트워크 이론을 이용하여 증명해 주었다. 현재 응력경로 해석은 해석시간의 문제로 2차원에 머물러 있지만, 앞서 구한 형상모수를 기반으로 3차원 형태의 ESO, Strut-and-Tie 모델, 콘크리트의 정밀 크랙 해석과 같은 해석을 수행하는데 있어, 해석 시간을 기하급수적으로 단축시킬 수 있을 것으로 보인다.

결론적으로 다중 연결 시스템의 취약성 해석은 지역사회 연속성 평가와 취약 지점의 분석 정확도를 높였다. 또한 본 연구에서 제시한 모델은 감마 분포에 의한 취약성 평가와 PCBF에 의한 취약 지점 분석을 수행할 수 있다. 그러므로 개발한 기법은 지역 사회의 발전에 따라 새롭게 구성되는

다중 연결 시스템의 취약성 평가 및 연쇄적 반응의 확대 억제 지점을 분석할 수 있어, 지역 사회의 취약성 감소로부터 연속성 방안 마련에 활용이 가능할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. Albert, R., & Barabási, A. L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of modern physics*, 74(1), 47.
2. Albert, R., Jeong, H., & Barabási, A. L. (1999). Internet: Diameter of the world-wide web. *nature*, 401(6749), 130-131.
3. Albert, R., Jeong, H., & Barabási, A. L. (2000). Error and attack tolerance of complex networks. *nature*, 406(6794), 378-382.
4. Allee, V. (2000). Reconfiguring the value network. *Journal of Business strategy*, 21(4), 36-39.
5. Anderson, R. M., & May, R. M. (1991). The spread of HIV-1 in Africa: sexual contact patterns and the predicted demographic impact of AIDS. *Nature*, 352(6336), 581.
6. Hoda, A., & Gulati, A. (2013). India's agricultural trade policy and sustainable development. *ICTSD Issue Paper*, 49.
7. Arianos, S., Bompard, E., Carbone, A., & Xue, F. (2009). Power grid vulnerability: A complex network approach. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 19(1), 013119.
8. Balcan, D., Colizza, V., Gonçalves, B., Hu, H., Ramasco, J. J., & Vespignani, A. (2009). Multiscale mobility networks and the spatial spreading of infectious diseases. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(51), 21484-21489.
9. Barabási, A. L., Albert, R., & Jeong, H. (2000). Scale-free characteristics of random networks: the topology of the world-wide web. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 281(1), 69-77.
10. Barabási, A. L., Albert, R., & Jeong, H. (1999). Mean-field theory for scale-free random networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 272(1), 173-187.
11. Barabási, A. L., & Albert, R. (1999). Emergence of scaling in random

- networks. *science*, 286(5439), 509–512.
12. Barabasi, A. L., & Oltvai, Z. N. (2004). Network biology: understanding the cell's functional organization. *Nature reviews genetics*, 5(2), 101–113.
 13. Barrat, A., Barthélemy, M., Pastor-Satorras, R., & Vespignani, A. (2004). The architecture of complex weighted networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(11), 3747–3752.
 14. Barrett, C. B., & Mutambatsere, E. (2008). Marketing boards.
 15. Barthélemy, M., Barrat, A., Pastor-Satorras, R., & Vespignani, A. (2004). Velocity and hierarchical spread of epidemic outbreaks in scale-free networks. *Physical Review Letters*, 92(17), 178701.
 16. Bathe, K. J., & Cimento, A. P. (1980). Some practical procedures for the solution of nonlinear finite element equations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 22(1), 59–85.
 17. Beauchamp, M. A. (1965). An improved index of centrality. *Systems Research and Behavioral Science*, 10(2), 161–163.
 18. Bell, M. G., Kurauchi, F., Perera, S., & Wong, W. (2017). Investigating transport network vulnerability by capacity weighted spectral analysis. *Transportation Research Part B: Methodological*, 99, 251–266.
 19. Birkel, R. C., & Reppucci, N. D. (1983). Social networks, information-seeking, and the utilization of services. *American journal of community psychology*, 11(2), 185–205.
 20. Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M., & Hwang, D. U. (2006). Complex networks: Structure and dynamics. *Physics reports*, 424(4), 175–308.
 21. Bonacich, P. (1987). Power and centrality: A family of measures. *American journal of sociology*, 92(5), 1170–1182.
 22. Borgatti, S. P., Mehra, A., Brass, D. J., & Labianca, G. (2009). Network analysis in the social sciences. *science*, 323(5916), 892–895.
 23. Busch, L., & Bain, C. (2004). New! Improved? The transformation of the global agrifood system. *Rural sociology*, 69(3), 321–346.
 24. Butts, C. T. (2008). Social network analysis: A methodological

- introduction. *Asian Journal of Social Psychology*, 11(1), 13–41.
25. Caldarelli, G. (2007). *Scale-free networks: complex webs in nature and technology*. Oxford University Press.
 26. Callaway, D. S., Newman, M. E., Strogatz, S. H., & Watts, D. J. (2000). Network robustness and fragility: Percolation on random graphs. *Physical review letters*, 85(25), 5468.
 27. Carrere, C. (2006). Revisiting the effects of regional trade agreements on trade flows with proper specification of the gravity model. *European Economic Review*, 50(2), 223–247.
 28. Chambers, R. (2014). *Rural development: Putting the last first*. Routledge.
 29. Cho, H., Gay, G., Davidson, B., & Ingraffea, A. (2007). Social networks, communication styles, and learning performance in a CSCL community. *Computers & Education*, 49(2), 309–329.
 30. Cohen, R., Erez, K., Ben-Avraham, D., & Havlin, S. (2000). Resilience of the internet to random breakdowns. *Physical review letters*, 85(21), 4626.
 31. Cohen, R., Erez, K., Ben-Avraham, D., & Havlin, S. (2001). Breakdown of the Internet under intentional attack. *Physical review letters*, 86(16), 3682.
 32. Cohen, R., & Havlin, S. (2011). Complex Networks. *Physic Journal*, 10(8), 96.
 33. Choi, W. (2012). Regular and irregular truss structure models equivalent to continuum structure. Ph. D. thesis: Seoul National University.
 34. Choi, K. P. (1994). On the medians of gamma distributions and an equation of Ramanujan. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 121(1), 245–251.
 35. Crucitti, P., Latora, V., Marchiori, M., & Rapisarda, A. (2004). Error and attack tolerance of complex networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 340(1), 388–394.
 36. Curtis, A. (2010). *The Well-Connected Community: A Networking Approach to Community Development* (2nd edn).
 37. Danon, L., Ford, A. P., House, T., Jewell, C. P., Keeling, M. J., Roberts, G. O., ... & Vernon, M. C. (2011). Networks and the epidemiology of infectious

- disease. *Interdisciplinary perspectives on infectious diseases*.
38. De Socio, M. (2007). Business community structures and urban regimes: A comparative analysis. *Journal of Urban Affairs*, 29(4), 339–366.
 39. Dechter, R., & Pearl, J. (1989). Tree clustering for constraint networks. *Artificial Intelligence*, 38(3), 353–366.
 40. Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1), 269–271.
 41. Dorogovtsev, S. N., & Mendes, J. F. (2002). Evolution of networks. *Advances in physics*, 51(4), 1079–1187.
 42. Eagle, N., Macy, M., & Claxton, R. (2010). Network diversity and economic development. *Science*, 328(5981), 1029–1031.
 43. Eames, K. T. (2008). Modelling disease spread through random and regular contacts in clustered populations. *Theoretical population biology*, 73(1), 104–111.
 44. Eames, K. T., & Keeling, M. J. (2002). Modeling dynamic and network heterogeneities in the spread of sexually transmitted diseases. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(20), 13330–13335.
 45. Euler, L. (1741). Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis. *Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae*, 8, 128–140.
 46. Fagiolo, G., Reyes, J., & Schiavo, S. (2008). On the topological properties of the world trade web: A weighted network analysis. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 387(15), 3868–3873.
 47. Fagiolo, G., Reyes, J., & Schiavo, S. (2008). On the topological properties of the world trade web: A weighted network analysis. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 387(15), 3868–3873.
 48. Ford, L. R., & Fulkerson, D. R. (1956). Maximal flow through a network. *Canadian journal of Mathematics*, 8(3), 399–404.
 49. Fraser, C., Riley, S., Anderson, R. M., & Ferguson, N. M. (2004). Factors that make an infectious disease outbreak controllable. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(16), 6146–6151.
 50. Freeman, L. (2004). The development of social network analysis. *A Study in*

the Sociology of Science, 1.

51. Freeman, L. C. (1978). Centrality in social networks conceptual clarification. *Social networks*, 1(3), 215-239.
52. Friedman, N. (2004). Inferring cellular networks using probabilistic graphical models. *Science*, 303(5659), 799-805.
53. Friedman, N., Geiger, D., & Goldszmidt, M. (1997). Bayesian network classifiers. *Machine learning*, 29(2-3), 131-163.
54. Gansner, E. R., & North, S. C. (2000). An open graph visualization system and its applications to software engineering. *Software Practice and Experience*, 30(11), 1203-1233.
55. Ghoshal, G., & Barabási, A. L. (2011). Ranking stability and super-stable nodes in complex networks. *Nature communications*, 2, 394.
56. Girvan, M., & Newman, M. E. (2002). Community structure in social and biological networks. *Proceedings of the national academy of sciences*, 99(12), 7821-7826.
57. Gong, K., Tang, M., Hui, P. M., Zhang, H. F., Younghae, D., & Lai, Y. C. (2013). An efficient immunization strategy for community networks. *PloS one*, 8(12), e83489.
58. Gudkov, V., & Nussinov, S. (2002). Graph equivalence and characterization via a continuous evolution of a physical analog. *arXiv preprint cond-mat/0209112*.
59. Haldar, A., & Mahadevan, S. (2000). *Reliability assessment using stochastic finite element analysis*. John Wiley & Sons.
60. Han, E. S., & Lee, Y. K. (2010). A Sstudy on the Eevaluation of the Competitiveness of Agricultural Products across Korea, China, and Japan. *Korea Trade Review*, 35(1), 305-334.
61. Hayama, Y., Muroga, N., Nishida, T., Kobayashi, S., & Tsutsui, T. (2012). Risk factors for local spread of foot-and-mouth disease, 2010 epidemic in Japan. *Research in veterinary science*, 93(2), 631-635.
62. Haydon, D. T., Chase-Topping, M., Shaw, D. J., Matthews, L., Friar, J. K., Wilesmith, J., & Woolhouse, M. E. J. (2003). The construction and analysis of

- epidemic trees with reference to the 2001 UK foot-and-mouth outbreak. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 270(1511), 121-127.
63. Hayward, D. J., & Heron, R. B. L. (2002). Horticultural Reform in the European Union and New Zealand: Further developments towards a global fresh fruit and vegetable complex. *Australian Geographer*, 33(1), 9-27.
 64. Hirsch, B. J. (1980). Natural support systems and coping with major life changes. *American Journal of Community Psychology*, 8(2), 159-172.
 65. Hoda, A., & Gulati, A. (2013). India's agricultural trade policy and sustainable development. *ICTSD Issue Paper*, 49.
 66. Hoekman, B., & Nicita, A. (2011). Trade policy, trade costs, and developing country trade. *World Development*, 39(12), 2069-2079.
 67. Hosseini, P. R., Fuller, T., Harrigan, R., Zhao, D., Arriola, C. S., Gonzalez, A., & Daszak, P. (2013). Metapopulation dynamics enable persistence of influenza A, including A/H5N1, in poultry. *PloS one*, 8(12), e80091.
 68. House, T., Davies, G., Danon, L., & Keeling, M. J. (2009). A motif-based approach to network epidemics. *Bulletin of Mathematical Biology*, 71(7), 1693-1706..
 69. Huberman, B. A., & Adamic, L. A. (1999). Internet: growth dynamics of the world-wide web. *Nature*, 401(6749), 131-131.
 70. Humphries, M. D., & Gurney, K. (2008). Network 'small-world-ness': a quantitative method for determining canonical network equivalence. *PloS one*, 3(4), e0002051.
 71. Im, B.H. (2012), A study on contagion effect of country shock through core-periphery and influence analysis of intra-regional trade networks among European countries. Asia-Europe Participation Association, 9(1), 93-117.
 72. Inkpen, A. C., & Tsang, E. W. (2005). Social capital, networks, and knowledge transfer. *Academy of management review*, 30(1), 146-165.
 73. Shavit, M. (1976). Export of fresh produce and flowers from Israel. The case of AGREXCO. In *International Conference on Marketing Systems for*

Developing Countries. Tel-Aviv (Israel). 6-10 Jan 1974.

74. Shavit, M. (1976). Export of fresh produce and flowers from Israel. The case of AGREXCO. In *International Conference on Marketing Systems for Developing Countries. Tel-Aviv (Israel). 6-10 Jan 1974.*
75. Israeli, E., & Wood, R. K. (2002). Shortest-path network interdiction. *Networks*, 40(2), 97-111.
76. Jeong, H., Tombor, B., Albert, R., Oltvai, Z. N., & Barabási, A. L. (2000). The large-scale organization of metabolic networks. *Nature*, 407(6804), 651-654.
77. Jolly, A. M., Muth, S. Q., Wylie, J. L., & Potterat, J. J. (2001). Sexual networks and sexually transmitted infections: a tale of two cities. *Journal of Urban Health*, 78(3), 433-445.
78. Kali, R., & Reyes, J. (2007). The architecture of globalization: a network approach to international economic integration. *Journal of International Business Studies*, 38(4), 595-620.
79. Kali, R., & Reyes, J. (2010). Financial contagion on the international trade network. *Economic Inquiry*, 48(4), 1072-1101.
80. Kaluza, P., Kölzsch, A., Gastner, M. T., & Blasius, B. (2010). The complex network of global cargo ship movements. *Journal of the Royal Society Interface*, 7(48), 1093-1103.
81. Kang, B. N., Ko G. I., Lee, D. S., & Kim, D. C. (2004). Structural characteristics and dynamics of complex networks. *The Korean Physical Society*, 48(2), 115-141.
82. Keeling, M. J., & Eames, K. T. (2005). Networks and epidemic models. *Journal of the Royal Society Interface*, 2(4), 295-307.
83. Keeling, M. J., & Rohani, P. (2008). *Modeling infectious diseases in humans and animals*. Princeton University Press.
84. Kim, J., & Wilhelm, T. (2008). What is a complex graph?. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 387(11), 2637-2652.
85. Kim, K. P. (2012). Analysis of operation status on leading group of agro-food export. *Institute Korean Journal of Agricultural Science*, 39(1), 143-149.

86. Kim, K. P., & Han, J. H. (2015) Management Status and Fostering of Agricultural Food Export Organizations. Korea Rural Economic Institute, 1-168.
87. Kim, Y. S., Jung, N. S., Lee, J. J., & Yoon, S. S. (2004). Development of a Stress Path Search Model of Evolutionary Structural Optimization Using TIN. *Journal of the Korean of agricultural engineers*, 63-71.
88. Kim, T. G., Lee, J. J., & Suh, K. (2014). Developmen to Truss Structure Analysis Model based on Cellular Automata and Object-oriented Simulation Environment. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 56(3),1-9.
89. Kleinberg, J., Kumar, R., Raghavan, P., Rajagopalan, S., & Tomkins, A. (1999). The web as a graph: measurements, models, and methods. *Computing and combinatorics*, 1-17.
90. Kossinets, G., & Watts, D. J. (2006). Empirical analysis of an evolving social network. *science*, 311(5757), 88-90.
91. Krempel, L., & Plümper, T. (2003). Exploring the dynamics of international trade by combining the comparative advantages of multivariate statistics and network visualizations. *Journal of social structure*, 4(1), 1-22.
92. Lambert, D. M., Cooper, M. C., & Pagh, J. D. (1998). Supply chain management: implementation issues and research opportunities. *The international journal of logistics management*, 9(2), 1-20.
93. Lee, C. W. (2009). Identifying ‘datural trading partners’ for South Korea. *Journal of Korea Trade*, 13(3), 25-41.
94. Lee, H. J., Suh, K., Jung, N. S., Lee, I. B., Seo, I. H., Moon, O. K., & Lee, J. J. (2014a). Prediction of the spread of highly pathogenic avian influenza using a multifactor network: Part 2-Comprehensive network analysis with direct/indirect infection route. *biosystems engineering*, 118, 115-127.
95. Lee, H., J. (2014). Spreading and Structural Reliability Analysis by Extraction of Hub Network with Gamma Distribution. Ph. D. thesis: Seoul National University.
96. Lee, H. K., Kim, T. G., & Lee, J. J. (2012). Development of an Object-oriented

- Finite Element Model through Iterative Method Ensuring Independency of Elements. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 54(2), 115-125.
97. Lee, J. (2002). A comparative study of natural disaster management policy and man-made disaster management policy: Measuring priorities using the Analytic Hierarchy Process. *Korean association of governmental studies (KAGOS)*, 165.
 98. Lee, J. J. (1991). Reliability analysis modeling of from structures based on discretized ideal plastic method. Ph. D. thesis: Seoul National University.
 99. Lee, J. M. (2014b). Evaluation of Entropy for Measuring Structural Characteristics of Complex Systems: Population Attractiveness of Rural Area and Reliability of Space Frame Structures. Ph. D. thesis: Seoul National University.
 100. Lee, Y. K. (2010), Effects of Agricultural Trade Liberalization through Free Trade Agreements: Trade Creation and Trade Diversion in Korea's Differentiated Beef Market. *Journal of Korea Trade*, 14(4), 1-28.
 101. Leskovec, J., Lang, K. J., Dasgupta, A., & Mahoney, M. W. (2009). Community structure in large networks: Natural cluster sizes and the absence of large well-defined clusters. *Internet Mathematics*, 6(1), 29-123..
 102. Li, H., Cao, J. N., & Love, P. E. D. (1999). Using machine learning and GA to solve time-cost trade-off problems. *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(5), 347-353.
 103. Lienert, J., Schnetzer, F., & Ingold, K. (2013). Stakeholder analysis combined with social network analysis provides fine-grained insights into water infrastructure planning processes. *Journal of environmental management*, 125, 134-148.
 104. Liu, Z., & Hu, B. (2005). Epidemic spreading in community networks. *EPL (Europhysics Letters)*, 72(2), 315.
 105. Lloyd, A. L., & May, R. M. (2001). How viruses spread among computers and people. *Science*, 292(5520), 1316-1317.
 106. Long, P., Jinliang, W., & Qiding, Z. (1995). Methods with high accuracy for

- finite element probability computing. *Journal of computational and applied mathematics*, 59(2), 181–189.
107. Lorterapong, P., & Moselhi, O. (1996). Project-network analysis using fuzzy sets theory. *Journal of Construction Engineering and Management*, 122(4), 308–318
 108. Luke, D. A., & Harris, J. K. (2007). Network analysis in public health: history, methods, and applications. *Annu. Rev. Public Health*, 28, 69–93.
 109. Mahutga, M. C. (2006). The persistence of structural inequality? A network analysis of international trade, 1965–2000. *Social Forces*, 84(4), 1863–1889.
 110. Marwan, N., Donges, J. F., Zou, Y., Donner, R. V., & Kurths, J. (2009). Complex network approach for recurrence analysis of time series. *Physics Letters A*, 373(46), 4246–4254.
 111. Minka, T. P. (2002). Estimating a Gamma distribution. Microsoft Research, Cambridge, UK, Tech. Rep.
 112. Miranda, V., Fidalgo, J. N., Lopes, J. P., & Almeida, L. B. (1995). Real time preventive actions for transient stability enhancement with a hybrid neural network-optimization approach. *IEEE transactions on power systems*, 10(2), 1029–1035.
 113. Moreno, Y., Pastor-Satorras, R., Vázquez, A., & Vespignani, A. (2003). Critical load and congestion instabilities in scale-free networks. *EPL (Europhysics Letters)*, 62(2), 292.
 114. Mucha, P. J., Richardson, T., Macon, K., Porter, M. A., & Onnela, J. P. (2010). Community structure in time-dependent, multiscale, and multiplex networks. *science*, 328(5980), 876–878.
 115. Nardelli, E., Proietti, G., & Widmayer, P. (2003). Finding the most vital node of a shortest path. *Theoretical computer science*, 296(1), 167–177.
 116. Newman, M. E. (2001). The structure of scientific collaboration networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(2), 404–409.
 117. Newman, M. E. (2004). Fast algorithm for detecting community structure in networks. *Physical review E*, 69(6), 066133.

118. Newman, M. E. (2006). Modularity and community structure in networks. *Proceedings of the national academy of sciences*, 103(23), 8577-8582.
119. Newman, M. E. (2003). The structure and function of complex networks. *SIAM review*, 45(2), 167-256.
120. Newman, M. E., Forrest, S., & Balthrop, J. (2002). Email networks and the spread of computer viruses. *Physical Review E*, 66(3), 035101.
121. Newman, M. E., Watts, D. J., & Strogatz, S. H. (2002). Random graph models of social networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(suppl 1), 2566-2572.
122. Nickbakhsh, S., Matthews, L., Bessell, P. R., Reid, S. W., & Kao, R. R. (2011). Generating social network data using partially described networks: an example informing avian influenza control in the British poultry industry. *BMC veterinary research*, 7(1), 66.
123. Oh, Y. S., Jung, M. J., & Kim, J. B. (2006). On the Structural Change of the Korea-China Trade and Logistics Network. *Journal of Korea Trade*, 10(3), 213-229.
124. Ooi, E. T., Song, C., Tin-Loi, F., & Yang, Z. (2012). Polygon scaled boundary finite elements for crack propagation modelling. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 91(3), 319-342.
125. Park, J., Seager, T. P., Rao, P. S. C., Convertino, M., & Linkov, I. (2013). Integrating risk and resilience approaches to catastrophe management in engineering systems. *Risk Analysis*, 33(3), 356-367.
126. Pastor-Satorras, R., & Vespignani, A. (2001). Epidemic spreading in scale-free networks. *Physical review letters*, 86(14), 3200.
127. Perry-Smith, J. E., & Shalley, C. E. (2003). The social side of creativity: A static and dynamic social network perspective. *Academy of management review*, 28(1), 89-106.
128. Pinquart, M., & Sörensen, S. (2000). Influences of socioeconomic status, social network, and competence on subjective well-being in later life: a

meta-analysis.

129. Pryke, S. D. (2004). Analysing construction project coalitions: exploring the application of social network analysis. *Construction management and economics*, 22(8), 787-797.
130. Rasmussen, J. (1997). Risk management in a dynamic society: a modelling problem. *Safety science*, 27(2), 183-213.
131. Redner, S. (1998). How popular is your paper? An empirical study of the citation distribution. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 4(2), 131-134.
132. Reichardt, J., & Bornholdt, S. (2004). Detecting fuzzy community structures in complex networks with a Potts model. *Physical Review Letters*, 93(21), 218701.
133. Rényi, A., & Erdos, P. (1959). On random graphs. *Publicationes Mathematicae*, 6(290-297), 5.
134. Riley, S., Fraser, C., Donnelly, C. A., Ghani, A. C., Abu-Raddad, L. J., Hedley, A. J., & Chau, P. (2003). Transmission dynamics of the etiological agent of SARS in Hong Kong: impact of public health interventions. *Science*, 300(5627), 1961-1966.
135. Romero, C., Ventura, S., & García, E. (2008). Data mining in course management systems: Moodle case study and tutorial. *Computers & Education*, 51(1), 368-384.
136. Sachtjen, M. L., Carreras, B. A., & Lynch, V. E. (2000). Disturbances in a power transmission system. *Physical Review E*, 61(5), 4877.
137. Sakurai, T. (2007). JETRO and Japan's Postwar Export Promotion System: Messages for Latin American Export Promotion Agencies. *Japón: Institute of Developing Economies, Discussion Paper*, (127), 1-17.
138. Salancik, G. R. (1986). An index of subgroup influence in dependency networks. *Administrative Science Quarterly*, 194-211.
139. Salathé, M., & Jones, J. H. (2010). Dynamics and control of diseases in networks with community structure. *PLoS computational biology*, 6(4),

e1000736.

140. Scott, J. (2017). *Social network analysis*. Sage.
141. Seo, I. H., & Lee, I. B. (2012, July). CFD application for estimation of airborne spread of HPAI (highly pathogenic avian influenza). In *1st International Symposium on CFD Applications in Agriculture 1008* (pp. 57-62).
142. Shieh, C. J., & Hu, R. (2016). Evaluating business performance of agricultural cooperation groups with Data Envelopment Analysis. *CUSTOS E AGRONEGOCIO ON LINE*, 12(1), 2-16.
143. Shin G. S., 2014, A Study of Vertical Integration to Expand Agricultural Export, Konkuk Univ.
144. Shu, P., Tang, M., Gong, K., & Liu, Y. (2012). Effects of weak ties on epidemic predictability on community networks. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 22(4), 043124.
145. Shutters, S. T., & Muneeppeerakul, R. (2012). Agricultural trade networks and patterns of economic development. *PloS one*, 7(7), e39756.
146. Smieszek, T., Fiebig, L., & Scholz, R. (2010). Models of epidemics: when contact repetition and clustering should be included. *Das Gesundheitswesen*, 72(08/09), V119.
147. Smith, D. A., & White, D. R. (1992). Structure and dynamics of the global economy: network analysis of international trade 1965-1980. *Social forces*, 70(4), 857-893..
148. Smith, D. A., & White, D. R. (1992). Structure and dynamics of the global economy: network analysis of international trade 1965-1980. *Social forces*, 70(4), 857-893.
149. Sporns, O. (2011). The human connectome: a complex network. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1224(1), 109-125.
150. Stauffer, D., Aharony, A., da Fontoura Costa, L., & Adler, J. (2003). Efficient Hopfield pattern recognition on a scale-free neural network. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 32(3), 395-399.
151. Stephens, P. G. (2006). A real community bridge: Informing community-based

- learning through a model of participatory public art. *Art Education*, 59(2), 40-46.
152. Steven, G. P., & Xie, Y. M. (1993). Evolutionary structural optimization with FEA. *Computational mechanics*, 1, 27-34.
 153. Strogatz, S. H. (2001). Exploring complex networks. *Nature*, 410(6825), 268-276.
 154. Ter Wal, A. L., & Boschma, R. A. (2009). Applying social network analysis in economic geography: framing some key analytic issues. *The Annals of Regional Science*, 43(3), 739-756.
 155. Thomason, A. (1987). Pseudo-random graphs. *North-Holland Mathematics Studies*, 144, 307-331.
 156. Travers, J., & Milgram, S. (1967). The small world problem. *Psychology Today*, 1, 61-67.
 157. Venter, J. C., Adams, M. D., Myers, E. W., Li, P. W., Mural, R. J., Sutton, G. G., ... & Gocayne, J. D. (2001). The sequence of the human genome. *science*, 291(5507), 1304-1351.
 158. Welsh, M. (2014). Resilience and responsibility: governing uncertainty in a complex world. *The Geographical Journal*, 180(1), 15-26.
 159. Wright, M. C. M., Winter, I. M., Forster, J. J., & Bleeck, S. (2014). Response to best-frequency tone bursts in the ventral cochlear nucleus is governed by ordered inter-spike interval statistics. *Hearing research*, 317, 23-32.
 160. Xu, Z., Zu, Z., Zheng, T., Zhang, W., Xu, Q., & Liu, J. (2014). Comparative analysis of the effectiveness of three immunization strategies in controlling disease outbreaks in realistic social networks. *PLoS one*, 9(5), e95911.
 161. Yoon, S. S., & Lee, J. J. (2002). A Study on the Reinforced Concrete using Evolutionary Structural Optimization, J of. *Korean Society of Agricultural Engineers*, 44(2), 127-135.
 162. Youn, D. N., Kim, T. G., Han, Y. C., & Lee, J. J. (2010). Development Model for Estimating Critical Path Probability of Element Path in PERT. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 52(2), 27-34.

163. Yue, D., Han, Q. L., & Lam, J. (2005). Network-based robust H^∞ control of systems with uncertainty. *Automatica*, *41*(6), 999-1007.
164. long Yuna, S. (2012). The EU' s Common Commercial Policy and Implications for Korea-EU Relations. *Journal of Korea Trade*, *16*(4), 57-71.
165. Zhao, K., Karsai, M., & Bianconi, G. (2011). Entropy of dynamical social networks. *PloS one*, *6*(12), e28116.

Abstract

Vulnerability Analysis of Multiple Connected System using Network Structure Probability Function

Sangkyu Eun

Major in Rural Systems Engineering

Department of Landscape Architecture and

Rural Systems Engineering

The Graduate School

Seoul National University

A system is a network composed of multiple connection structures because they are linked by an organic combination of elements and elements where an interaction occurs. The network uses nodes as a component, and shows the relationship of nodes as connection lines. A method of expressing multiple connection structure features as a probability function of connection number among network analysis

techniques is useful for understanding complex system. However, existing network vulnerability analysis has a disadvantage in that it is necessary to synthesize features of structural changes due to node removal using various analysis methods. Therefore, if we can directly evaluate the vulnerability of the system without using various methods, we can improve the efficiency of the analysis by using the probability function expressing the network connection structure.

Vulnerability analysis of multiple connection system using network is done by probabilistic analysis of weak points using cluster connection nodes and vulnerability analysis considering connection structure. The weak point of a multi – link system is a node that connects nodes and clusters with high network centroid. The centroids of the network are analyzed by the degree of connection and the degree of connection, and the cluster connection nodes are evaluated by the network cohesion variation measurement and the random walk based method. The vulnerability points analyzed by the random walk have the advantage that the information of the network can be used under unknown conditions. However, the weak point due to the random walk does not take into consideration the size of the connection line, and thus the application of the multiple connection system is limited. The weak point analysis of the multiple connection system improves the existing method by applying probability and convolution in order to consider the weighted line.

The multiple connection system, which simulates the complex phenomena resulting from the connections between the elements of the community, appears as a combination of a scaleless network and a random network. In random networks, the number of nodes has a uniform number, and the network without a scale is a nonuniform number of nodes in a node. Scaleless networks are more susceptible to removal of centrally located nodes, but the vulnerability of random networks is not affected by the order of removal of nodes. Therefore, the vulnerability of the network was determined by the distribution of the wires included in the node. The vulnerability assessment of a multiple-connection system should eliminate nodes and iterate the diameter and proximity of the network. The geometric parameters of the gamma distribution can represent the distribution of the line included in the nodes of the scaleless network and the random network and the distribution of the line connected to the nodes of the multiple connection system. The weakness evaluation of the system considering multiple connections utilized the shape parameter of the gamma distribution.

The connections between the components of the community have different network structures depending on the objects, such as the movement of people and logistics, and the sharing of information. The connection of domestic agricultural product export items is composed of the movement of logistics, and the specific item issued by the concentration of the linkage has increased the vulnerability of trade.

Avian influenza has been spreading due to the migration of people due to the movement of people, and it has been possible to reduce the spreading speed by slowing down the propagation speed or increasing the effect of the blocking point. In order to perform precise crack analysis of concrete, the stress path of the structure should be accurately searched. For this purpose, it is more efficient to replace it with an equivalent discrete rather than a continuous method. Therefore, the vulnerability analysis of the system considering the multiple connection structure was used to evaluate the degree of vulnerability of agricultural products exported, the linkage structure of the farms that could reduce the spread of avian influenza, and the irregular triangles. And analyzed the network conditions that can shorten the stress path analysis time.

As a result of analyzing the export items of fresh agricultural products, the results showed that the items subject to policy support increased the vulnerability of the network. In the problem of spread of avian influenza, diffusion prevention effect was higher as the connection structure between farmhouse and farmhouse became uneven. In the problem of the stress path search using the irregular triangulation network, it can be most efficiently performed when the connection line frequency of each node constituting the triangular network is 6. In summary, the vulnerability of the multiple connection system changes according to the ratio of the unequal structure and the uniform structure, and the multiple connection structure can be evaluated using

the shape parameter of the gamma distribution. As the shape parameter increases, the vulnerability of the system decreases in the form of exponential function. In the case of a system that is becoming complicated due to local development, it is necessary to consider the expansion / suppression point of the chain reaction, and the proposed vulnerability analysis method can be considered as an alternative.

keywords : Multi connected system, Network structure, Probability function, System vulnerability, Agricultural product trade network, HPAI spread network

Student Number : 2012–30315